

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA PARA
MAPEO TECNOLÓGICO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DEL
MUÑÓN DE DIRECCIÓN**

PRESENTA

JORGE HUMBERTO SERNA NADER

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

OCTUBRE, 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA PARA
MAPEO TECNOLÓGICO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DEL
MUÑÓN DE DIRECCIÓN**

PRESENTA

JORGE HUMBERTO SERNA NADER

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO OCTUBRE DE 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis **“DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE METODOLOGÍA PARA MAPEO TECNOLÓGICO DEL PROCESO DE MANUFACTURA DEL MUÑÓN DE DIRECCIÓN”** realizada por el alumno JORGE HUMBERTO SERNA NADER con número de matrícula **1504140** sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El comité de tesis



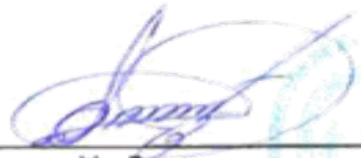
Dr. Tania Paloma Berber Solano
ASESOR



Dr. Martín Castillo Morales
REVISOR



Dr. Jesús Manuel Orona Hinojosa
REVISOR



Vo. Bo.
Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de estudios de posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Octubre de 2018

DEDICADA A:

A MIS PADRES, POR SIEMPRE CREER EN MÍ Y POR EL
INFINITO APOYO INCONDICIONAL QUE SIEMPRE ME BRINDAN.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Autónoma de Nuevo León** y a la **Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**, les agradezco la oportunidad brindada de pertenecer a su programa y a la excelente formación académica recibida.

Al **CONACYT** por el apoyo económico otorgado para realizar este proyecto.

A la empresa **Sistemas Automotrices de México, S. A. de C. V.** por permitirme ser parte de su equipo y haberme confiado la responsabilidad de llevar a cabo la maestría, así como también dar gracias a todos mis compañeros que me apoyaron para sacar adelante este proyecto.

Al **Dr. Jesús Manuel Orona Hinojos** quién fue mi asesor de planta y un gran amigo el cual siempre me ofreció su incondicional apoyo, también por todo el tiempo que me ha dedicado, por su amistad, por su confianza, por su paciencia y todo el conocimiento que ha compartido conmigo de manera desinteresada, por apoyarme en todos mis proyectos personales y profesionales y por siempre ayudarme a lograr mis objetivos y alentarme a seguir adelante.

A la **Dra. Tania Paloma Berber Solano** y **Dr. Martin Castillo Morales**, por todo el apoyo profesional y personal que me han brindado durante todo este tiempo, por confiar en mí, por permitirme formar parte de este programa y poder seguir desarrollándome a nivel profesional.

Al **Ing. Gilberto Villarreal de Lira**, así como también al **equipo de ingenieros de SISAMEX** por la ayuda que me han brindado para el desarrollo experimental de esta Tesis, por todos los conocimientos compartidos, por todas las recomendaciones hechas para lograr el éxito en los resultados obtenidos y por todo el tiempo que dedicaron a ayudarme.

A toda mi **FAMILIA** especialmente por todo el cariño, comprensión y apoyo que me han dado siempre.

A mi **NOVIA** porque siempre estuvo a mi lado apoyándome incondicionalmente y por demostrarme su cariño.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| DEDICADA A: | i |
| AGRADECIMIENTOS | ii |
| RESUMEN | 1 |
| CAPÍTULO 1 | 3 |
| 1.1 Planteamiento del Problema | 4 |
| 1.2 Hipótesis | 8 |
| 1.3 Objetivo General | 8 |
| 1.3.1 Objetivos Específicos | 8 |
| 1.4 Justificación | 9 |
| CAPÍTULO 2 | 11 |
| 2.1 Introducción | 11 |
| 2.2 Análisis de Árbol de Fallas (FTA) | 12 |
| 2.2.1 Pasos para el desarrollo de FTA: | 15 |
| 2.3 Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF) | 18 |
| 2.3.1 AMEF de Diseño | 19 |
| 2.3.2 AMEF de Proceso | 19 |
| 2.3.3 Partes que componen el AMEF | 20 |
| 2.4 Análisis de Modo y Efecto de Variación (VMEA) | 25 |
| 2.5 Desarrollo del modelo teórico VMEA para análisis de respuesta | 28 |
| 2.5.1 Paso 1: Desglose causal de KPC's | 29 |
| 2.5.2 Paso 2: Evaluación de sensibilidad | 30 |
| 2.5.3 Paso 3: Evaluación del tamaño de la variación | 32 |
| 2.5.4 Paso 4: Evaluación y priorización del riesgo de variación | 33 |
| 2.6 Otros Métodos para Análisis Estadísticos | 35 |
| 2.6.1 Análisis de Varianza (ANOVA) | 35 |
| 2.6.2 Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) | 36 |
| 2.6.3 Diseño de experimentos (DOE) | 37 |
| 2.6.4 Design Expert - software especializado para el desarrollo de DOE | 38 |
| CAPÍTULO 3 | 40 |
| 3.1 Especificaciones del producto. Muñón para eje de dirección | 40 |

| | |
|--|-----|
| 3.1.1 Características generales del acero AISI 4XX..... | 41 |
| 3.1.2 AISI 4XX Forja | 41 |
| 3.1.3 Aplicaciones y propiedades de forja..... | 41 |
| 3.1.4 Tratamiento térmico | 42 |
| 3.2 Tecnologías del proceso de maquinado actual (operaciones)..... | 43 |
| 3.3 Determinar las tecnologías núcleo del proceso de muñón de dirección | 49 |
| CAPÍTULO 4 | 52 |
| 4.1 Análisis de la Metodología para el mapa tecnológico de procesos de manufactura | 53 |
| 4.1.1 Descripción del VMEA en los procesos..... | 55 |
| 4.1.2 Evaluación Factibilidad de Parámetros Impulsores de la Tecnología | 57 |
| 4.1.3 Análisis de oportunidades para nuevas tecnologías. | 59 |
| 4.2 Elegir parámetros a evaluar | 60 |
| 4.3 Diseñar tabla de experimentos 2k (DOE) | 62 |
| 4.4 Desarrollo de experimentos – caso de estudio rolado de radios para muñón de dirección | 66 |
| 4.4.1 Selección de piezas para maquinado para pruebas experimentales | 67 |
| 4.5 Rayos X para determinar esfuerzos compresivos..... | 71 |
| CAPÍTULO 5 | 75 |
| 5.1 Análisis de los resultados para el caso de estudio rolado de radios para muñón de dirección..... | 75 |
| 5.2 Análisis de Factores para modelar la respuesta usando ANOVA. | 78 |
| 5.3 Evaluación del polinomio de segundo orden (modelo de respuesta). | 80 |
| 5.4 Obtención del modelo paramétrico de esfuerzos compresivos a través de la metodología VMEA | 84 |
| 5.4.1 Modelo Polinomial de Respuesta Diámetro de Sello | 86 |
| 5.4.2 Modelo Polinomial de Respuesta Diámetro de Balero Interior | 88 |
| 5.5 Resultados de la simulación de los modelos de respuesta para diámetro de Sello y diámetro de Balero Interior. | 89 |
| CAPÍTULO 6 | 104 |
| REFERENCIAS..... | 107 |
| LISTA DE TABLAS | 111 |
| LISTA DE FIGURAS | 112 |

RESUMEN

Debido a las exigencias del día a día dentro de la industria automotriz para producir productos de mejor calidad con especificaciones cada vez más estrictas, las empresas buscan siempre maneras nuevas para la optimización dentro de sus líneas de producción como la reducción de sus tiempos muertos, menor cantidad de desperdicio de piezas, operaciones más robustas, etc. Es por eso que para el caso de estudio de este proyecto se optó por tomar una operación crítica dentro de los diferentes procesos con los que cuenta Sistemas Automotrices de México S.A. de C.V. y poder utilizar una metodología que permita conocer, estudiar y optimizar los parámetros necesarios de la operación para poder brindar una nueva herramienta de trabajo como apoyo para la optimización y/o ajustes de los parámetros más importantes de dicha operación.

Dentro de los procesos más críticos con los que cuenta Sistemas Automotrices de México S.A. de C.V., debido a su complejidad en el desarrollo de sus especificaciones, se tiene el rolado de radios, el cual es una operación en donde se utiliza un rodillo como herramienta que permite obtener un acabado con una superficie pulida y a su vez genera esfuerzos compresivos en el área donde ejerce una presión para otorgar un mayor y mejor desempeño, en este caso, en el componente muñón, el cual se encuentra en la suspensión delantera y sirve como apoyo de las ruedas permitiéndoles girar.

Como parte de la metodología que se utilizó para el desarrollo de esta investigación fue el Análisis de Modo y Efecto de la Variación (por sus siglas en inglés VMEA) la cual permite tomar la mejor opción en cuestión de optimización de parámetros que permitan ofrecer un mejor rendimiento tanto en la operación como en el desempeño final del producto y los cuáles se eligen en un principio para su estudio con la ayuda de un diagrama de Ishikawa y en conjunto con los ingenieros expertos en la operación.

Una vez definidos los parámetros se realizó un diseño de experimentos para determinar la cantidad de pruebas experimentales que se llevarían a cabo dentro del centro de maquinado de la operación rolado de radios, tomando en consideración como parámetros críticos: desgaste de herramienta, velocidad de avance y presión hidráulica, posteriormente contando ya con las piezas maquinadas pasarían a pruebas en rayos X para determinar los esfuerzos compresivos y por último determinar con la ayuda del VMEA cuál sería la mejor opción

Cabe recalcar que la razón de ser de esta investigación fue el de desarrollar y aplicar una metodología que ayude o permita conocer que parámetros óptimos debemos de contar dentro de nuestros procesos para ofrecer el mejor rendimiento en la gama de productos y/o componentes que maneja SISAMEX permitiendo optimizar el uso de la tecnología con la que contamos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

México puede incrementar su competitividad como productor de vehículos y autopartes y convertirse en un importante centro de diseño y manufactura en el sector de vehículos pesados para el Mercado NAFTA (1) y tratado TRANSPACÍFICO (2). En este sentido, para América del Norte sólo tenemos una penetración del 39% para vehículos ligeros de clase 1 a 4, mientras que en Clase 5 a 8, para vehículos pesados, es menor siendo del 17% con tendencia a la baja, es decir estamos perdiendo mercado o estamos estancados y conforme el mercado crece se está moviendo a otras regiones. Para lo cual se requiere mejorar las competencias en los procesos de manufactura de alto valor en México, que permita incrementar la participación de mercado con un impulso desde el más alto nivel por medio de la integración de la industria, gobierno y academia, ya que el desarrollo del capital humano juega un papel fundamental, pues es sabido que un bajo nivel de capital humano limita la implementación de procesos de mayor valor.

Actualmente, la empresa SISAMEX, siendo una empresa Tier-1 del sector automotriz de vehículos pesados en México, cuenta con una gran variedad de procesos de manufactura metal mecánico en la producción de componentes críticos y ensamble del tren motriz entre estos, Ejes Traseros y Delanteros, Caja Diferencial, Flechas de Transmisión, Muñón de dirección , Frenos y Cajas entre otros, para el sector automotriz vehículos pesados “On-

highway” clase 5 a 8, con capacidades de carga que van desde 18,000 a 40,000 Lbs. También manufactura componentes del tren motriz para vehículos terrestres conocidos como “Off-Road” de gran capacidad. Que anualmente procesa y suministra un volumen considerable de partes con estándares de clase mundial a clientes OEM’s instalados en México y/o en el extranjero como lo es Meritor International, Freight Liner, Navistar, Continental, Kenworth y Daimler entre otros.

De los procesos con los que cuenta SISAMEX, se tienen principalmente estampado, soldadura, mecanizado, tratamientos térmicos y acabado que se realizan con máquinas de propósito específico co-desarrollados con casas de ingeniería especializadas en el extranjero, otros equipos integrados por ingenieros de la planta en combinación con soluciones tecnológicas maduras de integradores locales o nacionales, otras más de sistemas de producción adaptados de equipos con modificaciones en sus periféricos y herramientas para adaptarse a los requerimientos de producción de la planta.

Dentro de los distintos procesos con los que cuenta SISAMEX, se optó por tomar el proceso del componente muñón como caso de estudio y evaluar las operaciones que la conforman para posteriormente elegir la más crítica en cuestión de características del componente que se evalúan con categoría de “seguridad”. El muñón es considerado como uno de los componentes críticos en el sistema de suspensión automotriz. Es sometido a variaciones de cargas durante su vida útil, lo que lo lleva a la falla por fatiga. Por lo tanto, su diseño es un aspecto importante en el ciclo de desarrollo del producto (3).

1.1 Planteamiento del Problema

Las empresas de manufactura de clase mundial del sector automotriz de manera global, se enfrentan a prospectivas tecnológicas que proveen los fabricantes de equipo original (OEM) en materia de tecnologías de vanguardia

que dista mucho de la necesidad específica o personalización que demandan sectores especializados como: Estructural mecánico, carrocería, panel de control, tren de potencia, tren motriz etc., que se diversifica aún más, si se clasifica por tipo de vehículo: automóvil comercial de uso personal clase 1 (72%), Vagonetas ligeras Clase 2-3 (22% LDV's), camioneta de carga media clase 4-6 (aprox 6% MDV's) y finalmente camión o tractor clase 7-8. Por lo que se hacen inversiones cuantiosas en adquisición de tecnologías en compra de activos por Inversiones en bienes de capitales (CAPEX, por sus siglas en inglés) de una plataforma común, donde los grupos de Innovación y Desarrollo se esfuerzan por encontrar las mejores ofertas tecnológicas, convirtiendo una filosofía de ventaja competitiva en un problema de compras al mejor costo. Finalmente, estas adquisiciones de tecnologías terminan usando solo una fracción de las ventajas ofertadas, por su oferta tendenciosa en la mayor amplitud del mercado demandante. Por otra parte, la ventaja adquirida se diluye fácilmente porque la tecnología está ofertada en un mercado abierto y es de fácil adquisición si se cuenta con los recursos.

Entonces se busca contar con una metodología que permita mapear las tecnologías núcleo que generan valor para la empresa en procesos específicos, y encontrar en los sub-procesos de manufactura clave, los parámetros que impulsan los cambios tecnológicos, conocidos como parámetros impulsores de la tecnología (PIT). Posteriormente asociar los PIT's a los procesos de manufactura que agregan valor mapeando las ventajas potenciales para establecer un Plan de Evolución Tecnológica por etapas que detone proyectos de inversión dirigidos a desarrollar brechas tecnológicas que muevan los parámetros a un diferencial competitivo. Por ejemplo, actualmente la tecnología de mecanizado por corte para componentes de los aceros tiene una velocidad de corte (VC) que en la actualidad se encuentra en su condición límite por efecto de ablandamiento por temperatura de fusión de los aceros, ya que su principio de remoción es por corte mecánico de una herramienta sobre un material, provee resistencia más allá del esfuerzo de cedencia plástica, que al calentarse disminuye severamente su eficiencia. Por lo que, es posible buscar

alternativas de corte con la mínima afectación térmica, sin contacto del herramental de corte, para romper la barrera de este parámetro tecnológico, y tener una ventaja tecnológica.

El desarrollo de este proyecto iniciará en el proceso de manufactura del “Muñón de Dirección” que se tomará como punto de partida (caso de estudio), para obtener una metodología validada y estandarizada que posteriormente pueda implementarse en los demás procesos de manufactura de la empresa.

Debido a la necesidad de controlar las variables estocásticas existentes dentro de las operaciones del proceso del muñón, las técnicas estadísticas convencionales están limitadas, entonces se busca implementar un método para analizar los múltiples factores de variaciones en los parámetros claves de las operaciones (velocidad de herramienta, desgaste de herramienta, acabados superficiales, lubricación, etc.), para posteriormente definir un control de la operación y las relaciones límites de estas variables que ofrezcan un mejor desempeño mecánico en el componente del muñón.

Al final del desarrollo de la metodología, se pretende tener un mejor control sobre las distintas variables de operación encontradas y expuestas a pruebas experimentales para determinar cuáles son las de mayor impacto en la operación, definir un plan tecnológico sobre la siguiente generación y así poder buscar mejoras en cuestión de calidad, desgaste de herramientas, ahorros de energía, etc.

Tabla 1. 1. Ejemplos de Parámetros Impulsores de la Tecnología (PIT)

| Parámetros Impulsores de la tecnología (PIT) | Unidades |
|---|---------------------|
| 1-. Módulo de Young | MPa |
| 2-. Esfuerzo de cedencia | MPa |
| 3-. Resistencia de tensión | MPa |
| 4-. Velocidad de husillo | m/min |
| 5-. Velocidad de avance | mm/rpm |
| 6-. Presión Hidráulica | bar |
| 7-. Desgaste (Fricción) | $\frac{m^2}{N * s}$ |
| 8-. Diámetro de la herramienta | mm |
| 9-. Rugosidad de la superficie | mm |

1.2 Hipótesis

El establecimiento de una metodología de diseño para los procesos de manufactura permitirá determinar los parámetros impulsores clave, predecir el nivel de priorización del riesgo y la relación con las características del proceso de manufactura, logrando detectar oportunidades de cambios en las direcciones tecnológicas correctas.

1.3 Objetivo General

Desarrollar e implementar una metodología de diseño que permita determinar y evaluar los parámetros impulsores clave de los procesos de manufactura, para ofrecer el mejor rendimiento en la gama de productos y/o componentes de la empresa SISAMEX.

1.3.1 Objetivos Específicos

1. Desarrollar el estado del arte en metodologías aplicables a procesos de manufactura que permitan predecir la confiabilidad del producto/proceso.
2. Identificar, definir y evaluar la Característica Clave del Proceso (KPC, por sus siglas en inglés) de la operación Rolado de Radios del proceso de Muñones por medio de la metodología VMEA, con el fin de identificar los Factores de ruido (NF, por sus siglas en inglés) y darles priorización a cada uno de acuerdo al impacto que puedan tener en la KPC que se está evaluando.
3. Realizar un VMEA que determine los factores variacionales y Número de Prioridad de Riesgo de la Variación (VPRN, por sus siglas en inglés) en la respuesta de los esfuerzos internos compresivos del Proceso de Rolado de Radio del Sello.

4. Realizar un VMEA que determine los factores variacionales y VPRN en la respuesta de los esfuerzos internos compresivos del Proceso de Rolado de Radio del Balero Interior.
5. Obtener y validar un modelo estadístico que correlacione las respuestas de los esfuerzos internos compresivos de los radios del Muñón a través de un Diseño de Experimentos (DOE), midiendo con un equipo de Difracción de Rayos-X.

1.4 Justificación

Actualmente, Sisamex cuenta con una gran variedad de procesos de manufactura metal mecánico en la producción de componentes críticos del sector automotriz para vehículos pesados. Existen procesos de estampado, soldadura, mecanizado y acabado.

Por lo que se requiere contar con una metodología que permita generar mapas tecnológicos en procesos de manufactura críticos del sector automotriz, basada en los procesos núcleos, cadena de valor y los parámetros impulsores de la tecnología (PIT). Esto permitirá:

Detectar las brechas tecnológicas en la cadena de valor. Esto permitirá adaptarse con mayor velocidad a los cambios/avances tecnológicos que ocurran en el mercado y por lo tanto mantenerse competitivos.

Establecer el nivel tecnológico de la planta por operación. Permitirá conocer en qué situación a nivel tecnológico, se encuentra cada proceso de la planta enfocándose en cada una de las operaciones y comparándolas con el estado de arte y el mercado actual.

Generar un plan regulador de CAPEX. Que puedan mover las ventajas competitivas de los procesos de Sisamex, mediante un plan de

transformación basado en inversión de activos en las operaciones de mayor beneficio o impacto para nuestros clientes.

En el caso particular del proceso de manufactura de Muñones de Dirección, el rolado de radios es un proceso crítico de falla por fatiga en este componente. La característica del proceso de rolado es mantener un nivel de esfuerzos compresivos sobre los diámetro del Sello y diámetro del Balero Interior que aseguren la confiabilidad del producto en campo. El proceso de rolado de muñones presenta “n-factores de varianza” y tiene un efecto directo con los esfuerzos compresivos a lograr. Existe una relación directa de los factores de varianza con los parámetros tecnológicos en función del tipo de tecnología a evaluar. Al analizar las tecnologías de rolado se encuentra que los desarrolladores incentivan ciertos parámetros tecnológicos para ofertar ventajas competitivas del proceso de manufactura, pero afectan las relaciones de los factores de varianza como Desgaste, Velocidad de Avance, Nivel de Carga, etc. sin alguna prioridad. Cuando interactúan con un ambiente productivo estas relaciones son sensibles al entorno y producen efectos variacionales de la respuesta del proceso. Resultando en afectación en la capacidad del Proceso de manufactura y perdiendo la ventaja productiva a razón de mantener la estabilidad en un nivel operativo aceptable, en tanto se cumpla la especificación de desempeño del producto acordado con el cliente.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE LAS METODOLOGÍAS DE DESARROLLO DEL PRODUCTO Y/O PROCESO

2.1 Introducción

La posibilidad de predecir la confiabilidad del hardware tanto para componentes como sistemas, es importante en el diseño de ingeniería. Hoy en día, existen varios métodos para poder predecir la confiabilidad de los sistemas de hardware y también para la identificación de las causas de falla y modos de fallo, por ejemplo, el **Análisis de Árbol de Fallas (FTA Fault Tree Analysis)**, **Análisis de Modo y Efectos de la Falla (AMEF)** y **Análisis de Modo y Efecto de la Variación (VMEA)**, **ANOVA** y **RSM**.

Hoy en día, estos métodos permiten predecir la fiabilidad del sistema que se componen de varios componentes. Un método comúnmente utilizado para predecir la fiabilidad de los sistemas de hardware complejos es el análisis de árbol de fallas (FTA). Es un proceso deducible utilizado para determinar las varias combinaciones de fallas de equipo electrónico (hardware), programas de computación (software) y errores humanos que pueden causar eventos indeseables al nivel del sistema. El motivo principal del análisis árbol de falla es el ayudar a identificar causas potenciales de falla de sistemas antes de que

ocurran. También puede ser utilizado para evaluar la probabilidad del evento más alto utilizando métodos analíticos o estadísticos (4).

Análisis de modo y efecto de la Falla (AMEF) es un método de uso común que se utiliza ampliamente en la industria automotriz (5). AMEF es una metodología analítica utilizada en los círculos de desarrollo de productos para asegurar que los problemas potenciales se han considerado y tratado. Cuando se usa apropiadamente, este provee mucho beneficios, los cuales son: 1) Mejor calidad producto/proceso, confiabilidad y seguridad, 2) reduce el tiempo de desarrollo, 3) menor número de cambios a última hora, 4) incremento en la satisfacción del cliente, 5) tiempo más corto hacia el mercado, 6) temprana identificación y eliminación de posibles modos de falla del producto, 7) validación mejorada del proceso, 8) garantía reducida, 9) pruebas documentadas con la diligencia debida, y 10) mejora de imagen de la empresa y su competitividad (6).

Al día de hoy, muchos fracasos son causados debido a las variaciones que pudieran ocurrir en los procesos (fuerza, cargas, las tolerancias de fabricación, etc.), dando lugar a reclamos costosos y la insatisfacción que puede conducir a la pérdida de clientes. Por lo tanto, se creó un método llamado Análisis de Modo y Efecto de Variación (VMEA), el cual es un método deductivo de identificación y gestión de fuentes de variación. El método VMEA se ha dividido en tres niveles diferentes: Básico VMEA, Mejorado VMEA y Probabilístico VMEA. Hasta ahora, pocos estudios han comparado el VMEA a las herramientas tradicionales como el TLC y AMEF por medio de utilidad en el desarrollo de productos (7).

2.2 Análisis de Árbol de Fallas (FTA)

Los árboles de fallas son herramientas que se utilizan para poder localizar y corregir fallas. Aunque también se puedan utilizar para prevenirlas o

identificarlas antes de que ocurran, se utilizan más con la finalidad de analizar accidentes o para señalar fallas. Al momento de que ocurra una falla o accidente, se puede identificar la causa raíz del evento negativo.








El análisis Árbol de Falla (FTA), fue introducido por primera vez por *Bell Laboratories* y es uno de los métodos más ampliamente usados en sistemas de relatividad, mantenimiento y análisis de seguridad. Es un proceso deducible utilizado para determinar las varias combinaciones de fallas de equipo electrónico (hardware), programas de computación (software) y errores humanos que pueden causar eventos indeseables (referidos como eventos altos) al nivel del sistema (8). El FTA fue desarrollado por ingenieros para mejorar la seguridad de los sistemas de los de misiles. Entendieron que la mayoría de accidentes/incidentes resultan de fallas inherentes a un sistema. Un sistema consta de personas, equipo, material y factores ambientales. Este sistema realiza tareas específicas con métodos recomendados. Los componentes de un sistema y su ambiente están interrelacionados, y una falla con cualquier parte puede afectar las demás partes (9).

Para analizar cada evento se debe hacer la pregunta, “¿Cómo sucedió?”. Al contestar la pregunta, se debe identificar las causas principales y de qué manera interactúan para que se produzca un evento no deseado. Se sigue con este proceso de lógica hasta que se identifiquen todas las causas posibles.

A lo largo de todo el proceso, se utiliza un diagrama de árbol para grabar los eventos identificados. Las ramas del árbol terminan cuando estén completos todos los eventos que resultan en el evento negativo.

Se utilizan símbolos para representar varios eventos y para describir relaciones:

Tabla 2. 1. Símbolos para desarrollar diagrama de árbol (9)

| Figura | Puerta/Símbolo | Descripción |
|---|-----------------------|--|
|  | Puerta Y | Representa una condición en la cual todos los eventos mostrados debajo de la puerta (puerta de entrada) tienen que estar presentes para que ocurra el evento arriba de la puerta (evento de resultado). Esto significa que el evento de resultado ocurrirá solamente si todos los eventos de entrada existen simultáneamente. |
|  | Puerta O | Representa una situación en la cual cualquier de los eventos mostrados debajo de la puerta (puerta de entrada) llevarán al evento mostrado arriba de la puerta (evento de resultado). El evento ocurrirá si solamente uno o cualquier combinación de los eventos de entrada ocurren. |
|  | Rectángulo | El rectángulo es el principal componente básico del árbol analítico. Representa el evento negativo y se localiza en el punto superior del árbol y puede localizarse por todo el árbol para indicar otros eventos que pueden dividirse más. Este es el único símbolo que tendrá abajo una puerta de lógica y eventos de entrada. |
|  | Círculo | Un círculo representa un evento base en el árbol. Estos se encuentran en los niveles inferiores del árbol y no requieren más desarrollo o divisiones. No hay puertas o eventos debajo del evento base. |
|  | Diamante | El diamante identifica un evento terminal sin desarrollar. Tal evento es uno no completamente desarrollado debido a una falta de información o significancia. Una rama del árbol de fallas puede terminar con un diamante. Por ejemplo, la mayoría de los proyectos requieren personal, procedimientos, y equipo. El desarrollador del árbol tal vez decida enfocarse en el aspecto de personal del procedimiento y no en los aspectos del equipo o procedimientos. En este caso se usa diamantes para mostrar “procedimientos” y “equipo” como eventos terminales no desarrollados. |
|  | Óvalo | Un símbolo de oval representa una situación especial que puede ocurrir solamente si ocurren ciertas circunstancias. Esto se explica dentro del símbolo del ovalo. Un ejemplo de esto tal vez sea el caso de que si hay que cerrar ciertos interruptores por una secuencia específica antes de ocurrir una acción. |
|  | Triángulo | El triángulo significa una transferencia de una rama del árbol de fallas a otro lugar del árbol. Donde se conecta un triángulo al árbol con una flecha, todo lo que esté mostrado debajo del punto de conexión se pasa a otra área del árbol. Esta área se identifica con un triángulo correspondiente que se conecta al árbol con una línea vertical. Letras, números o figuras diferencian un grupo de símbolos de transferencia de otro. |

2.2.1 Pasos para el desarrollo de FTA:

1.- Definir el evento superior.

Se debe identificar el tipo de falla que se vaya a investigar, el cuál podría ser el resultado final de algún incidente, como el volcarse un montacargas.

Determine todos los eventos no deseados en la operación de un sistema. Separe esta lista en grupos con características comunes. Varios FTA tal vez sean necesarios para estudiar un sistema completamente. Finalmente, un evento debe establecerse que representa todos los eventos dentro de un grupo. Este evento llega a ser el evento no deseado que se va a estudiar.

2.- Conocer el sistema.

Se debe estudiar toda la información disponible sobre el sistema y su ambiente. Puede ser de ayuda un análisis de trabajo para determinar la información necesaria.

3.- Construir el árbol.

El árbol se debe de construir utilizando símbolos de eventos nombrados en la Tabla 1, debe de ser sencillo y mantener un formato lógico, uniforme y consistente de nivel a nivel. También se debe utilizar títulos claros y precisos al escribir dentro de los símbolos de eventos. Las puertas de lógica deben limitarse a “la puerta y” y “la puerta o” y se debe usar símbolos de restricción solamente cuando sea necesario. Un ejemplo que se describe (8) sería el de usar el símbolo ovalo de restricción para ilustrar una secuencia necesaria de eventos que tienen que suceder para que ocurra un evento. Mientras que el triángulo de transferencia se debe de usar muy poco o nunca, ya que, mientras más se use, más complicado se pondrá el árbol. El propósito de esta herramienta es de mantener el procedimiento tan sencillo como sea posible.

4.- Validar el árbol.

Se requiere de un experto que conozca el proceso para verificar que el árbol esté completo y exacto.

5.- Evaluar el árbol.

Se examinan las áreas donde se pueden hacer mejoras en el análisis o donde tal vez haya oportunidad de utilizar procedimientos o materiales alternativos que pudieran disminuir el peligro.

6.- Considerar cambios constructivos.

En cualquier método alternativo que se implementen se deben evaluar más con el propósito de que los asesores vean cualquier problema que esté relacionado con el nuevo procedimiento antes de implementarlo.

7.- Considerar alternativas y recomendar medidas.

En el último paso se recomiendan acciones correctivas o medidas alternativas.

Beneficios: La ventaja principal de los análisis de árbol de falla son los datos valiosos que producen para permitir evaluar y mejorar la fiabilidad general del sistema. También evalúa la eficiencia y la necesidad de redundancia.

Limitación: Una limitación del análisis de árbol de fallas es que el evento no deseado que se está evaluando tiene que ser previsto y todos los factores contribuyentes a la falla tienen que ser anticipados. Este esfuerzo puede llevar mucho tiempo y puede ser muy caro. Y finalmente, el éxito en general del proceso depende de la habilidad del analista que esté involucrado.

Ejemplo

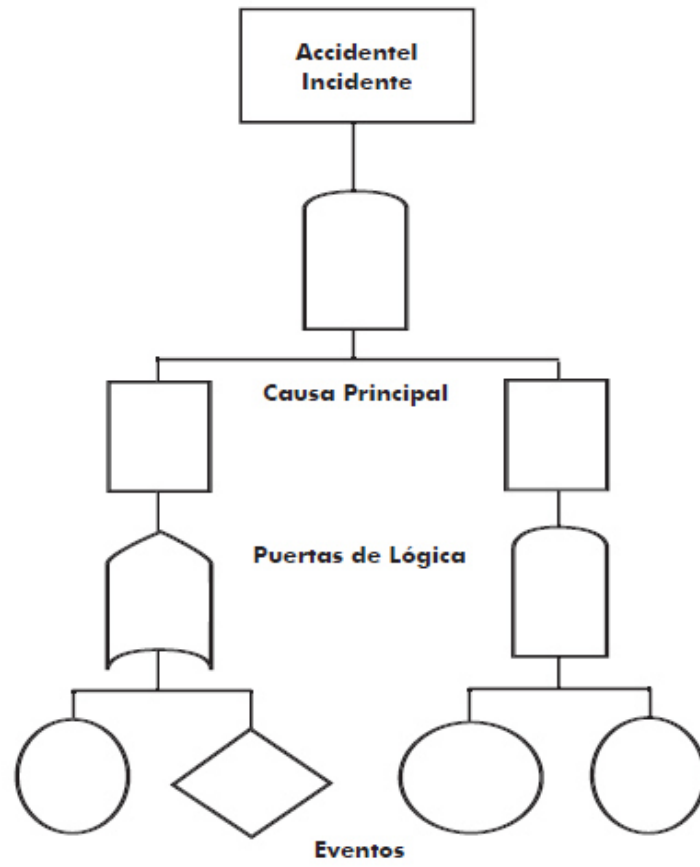


Figura 2. 1. Ejemplo de diagrama de análisis árbol de falla (9)

2.3 Análisis de Modo y Efecto de Falla (AMEF)

El Análisis de Modo y Efecto de Fallos (AMEF) es un conjunto de directrices, un método y una forma de identificar problemas potenciales (errores) y sus posibles efectos en un sistema para priorizarlos y poder concentrar los recursos en planes de prevención, supervisión y respuesta (10).

El AMEF fue formalmente introducido a finales de los 40's mediante el estándar militar 1629. Utilizados por la industria aeroespacial en el desarrollo de cohetes, los AMEF's y el todavía más detallado Análisis Crítico del Modo y Efecto de Falla (AMEF) fueron de mucha ayuda en evitar errores sobre tamaños de muestra pequeños en la costosa tecnología de cohetes.

El principal empuje para la prevención de fallas vino durante los 60's mientras se desarrollaba la tecnología para enviar un hombre a la luna en la misión Apolo. Ford Motor Company motivados por los altos costos de demandas de responsabilidad civil introdujo los AMEF's en la industria automotriz a finales de los 70's para consideraciones de seguridad y requisitos regulatorios.

En 1993 Chrysler, Ford y GM crearon el documento «Potencial Failure Mode And Effects Analysis» que cubría los tipos vigentes de AMEF. El documento formo parte de la norma QS 9000 (Hoy conocida como ISO 16949).

Los Beneficios de implantación de AMEF en un sistema son:

- Identifica fallas o defectos antes de que estos ocurran
- Reducir los costos de garantías
- Incrementar la confiabilidad de los productos/servicios (reduce los tiempos de desperdicios y re-trabajos)
- Procesos de desarrollo más cortos

- Documenta los conocimientos sobre los procesos
- Incrementa la satisfacción del cliente
- Mantiene el Know-How en la compañía

2.3.1 AMEF de Diseño

El ingeniero de diseño tendrá a su disposición una cantidad de documentos que serán de utilidad en la preparación del AMEF de diseño potencial. El proceso comienza al desarrollar un listado de lo que se espera que haga y que no haga el diseño, por ejemplo: la intención del diseño. Deberá incorporarse lo que el cliente quiere y necesita, que puede determinarse por fuentes tales como el Despliegue de la Función de Calidad (QFD), requerimientos del producto conocidos y/o requisitos de manufactura. Mientras mejor sea la definición de las características deseadas, será más fácil identificar modos de falla potencial para una acción correctiva (5; 11; 12).

- Se utiliza para analizar los componentes de diseños.
- Se enfoca hacia los Modos de Falla asociados con la funcionalidad de algún componente, causado por el diseño.
- Evalúa los subsistemas del producto o servicio.

2.3.2 AMEF de Proceso

El AMEF de Proceso debe comenzar con un diagrama de flujo del proceso. Este diagrama deberá identificar las características del producto que se fabricará en cada operación. Se puede obtener identificación de algunos efectos y asignación de algunos grados de severidad por medio del ingeniero responsable de Diseño correspondiente, si está disponible (5; 11).

- No debe utilizar controles en el proceso para superar debilidades del diseño.

- Se utiliza para analizar los procesos de manufactura, ensamble o instalación. Se enfoca en la capacidad para producir el requerimiento que se pretende.
- Los Modos de Falla pueden derivar de causas identificadas en el AMEF de Diseño.
- Asume que el producto según el diseño cumplirá su intención final.
- Evalúa cada proceso y sus respectivos elementos.
- Usado en el análisis de proceso y transiciones.

2.3.3 Partes que componen el AMEF

- 1) **Nombres/subsistema:** Registrar el nombre y número del subsistema.
- 2) **Responsabilidad del diseño:** Anotar el nombre del área responsable del diseño del componente, ensamble o sistema.
- 3) **Otras áreas involucradas:** Anotar cualquier área/departamento u organizaciones afectadas o involucradas en el diseño o función del componente.
- 4) **Proveedores y plantas afectadas:** Enlistar proveedor o plantas manufactureras involucradas en el diseño o fabricación de los componentes o ensambles que se están analizando.
- 5) **Productos:** Registrar todas las líneas de productos que utilizarán el diseño que se está analizando.
- 6) **Fecha de liberación de Ingeniería:** Indique la fecha programada para la liberación del ensamble o componente.
- 7) **Preparado por:** Indicar nombre, teléfono, dirección y compañía del ingeniero que prepara el AMEF
- 8) **Fecha del AMEF:** Anotar la fecha en que se desarrolló el AMEF original y posteriormente, anotar la fecha de la última revisión del AMEF.
- 9) **Nombre y número de parte/función:** - Registrar nombre y número de la parte o ensamble que se está analizando. - Utilizar sufijos, cambiar letras y/o números del reporte de problema/solicitud de cambio, según sea el caso. - Se debe utilizar números de partes experimentales. - Indicar

brevemente la función de la parte o ensamble que se está analizando. -
 Listar funciones por separado cuando se tiene un ensamble con varias funciones con diversos modos potenciales de falla.

- 10) **Modo de falla potencial:** Listar cada modo de falla potencial por cada parte en particular y función de la parte.
- 11) **Efecto de la falla potencial:** Describir los efectos de falla en términos de lo que el cliente podría notar o experimentar. Estos deberán indicarse siempre en términos del desempeño del vehículo o sistema.
- 12) **Severidad:** Es una estimación de la seriedad del efecto del modo de falla potencial. La severidad se aplica en el efecto únicamente. Solamente mediante un cambio de diseño se puede efectuar una reducción en el Índice del Grado de Severidad. La severidad deberá estimarse en una escala de 1 a 10.

| CRITERIO DE EVALUACION. | |
|---|--------------|
| <i>Severidad del efecto</i> | <i>Grado</i> |
| Menor: No es razonable pensar que la naturaleza menor de esta falla causaría algún efecto real en el comportamiento del vehículo o sistema. | 1 |
| Bajo: Un bajo rango de severidad debido a la naturaleza de la falla que causa solamente una ligera inconformidad del cliente. | 2 3 |
| Moderado: Un rango moderado es cuando la falla causa alguna insatisfacción por parte del cliente. Esta falla lo incómoda o molesta. | 4 5 6 |
| Alto: Un alto nivel de insatisfacción del cliente por la naturaleza de la falla del cliente. | 7 8 |
| Muy Alto: Un grado de severidad muy alto será cuando un modo de falla potencial afecta la seguridad de la operación del producto y/o involucre incumplimiento con las regulaciones gubernamentales. | 10 |

Figura 2. 2. Criterio de evaluación para Severidad (5)

- 13) **Características críticas:** Se debe identificar anotando una delta invertida en esta columna (Severidad). Después se determina si la delta invertida debe asignarse siguiendo el diagrama de flujo en la práctica de ingeniería, cada vez que el grado de severidad sea de 9 ó 10 y la ocurrencia y detección sean ambos mayores de 1.
- 14) **Causa(s) de falla potencial:** Listar cada causa concebible de falla asignable a cada modo de falla.
- 15) **Ocurrencia:** Es la probabilidad de que una causa resulte en modo de falla. Para reducir la ocurrencia se debe remover o controlar ya sea una o más causas de modo de falla.

| CRITERIO DE EVALUACION | | |
|---------------------------------------|--------------|------------------------|
| Probabilidad de Falla | Grado | Posibles Fallas |
| Remota: La falla es poco probable | 1 | <1 en 1000000 |
| Baja: Relativamente pocas fallas | 2 | 1 en 20000 |
| | 3 | 1 en 4000 |
| Moderada: Fallas ocasionales | 4 | 1 en 1000 |
| | 5 | 1 en 400 |
| | 6 | 1 en 80 |
| Alta: Fallas repetidas | 7 | 1 en 40 |
| | 8 | 1 en 20 |
| Muy alta: La falla es casi inevitable | 9 | 1 en 8 |
| | 10 | 1 en 2 |

Figura 2. 3. Criterio de evaluación para Ocurrencia (5)

- 16) **Controles actuales:** Previenen que ocurra el modo de falla o lo detectan en caso de que ocurra. Pueden ser controles del proceso tal como herramientación a prueba de fallas o Control Estadístico del Proceso (CEP), o pueden ser inspección/pruebas después del proceso.
- 17) **Detección:** Es una evaluación de la probabilidad de que los controles del proceso detecten el modo de falla, antes de que la parte o componente salga de la industria o ensamble.

| CRITERIO DE EVALUACION | |
|---|---------------------|
| <i>Probabilidad de que la Existencia de un Defecto sea Detectada por los controles del próximo o subsecuente proceso</i> | <i>Grado</i> |
| Muy alta: Los controles casi seguramente detectarán la existencia de un defecto | 1 2 |
| Alta: Los controles tienen buena oportunidad de detectar la existencia de un defecto | 3 4 |
| Moderada: Es posible que los controles detecten la existencia de un defecto | 5 6 |
| Baja: Los controles tienen poca oportunidad de detectar la existencia de un defecto | 7 8 |
| Muy baja: Probablemente los controles no detectarán la existencia de un defecto | 9 |
| Certeza absoluta de no detección: Los controles no detectarán o no podrán detectar la existencia de un defecto. | 10 |

Figura 2. 4. Criterio de evaluación para Detección (5)

- 18) **Número de prioridad de Riesgo (NPR):** Es la multiplicación entre los grados de ocurrencia, severidad y detección. Este valor permite priorizar los problemas que existan en el proceso.
- 19) **Acciones Recomendadas:** Sirven para reducir los grados de ocurrencia, severidad y/o detección por medio de acciones correctivas.
- 20) **Área/Individuo responsable y fecha de terminación:** Registrar el área y la persona responsable de la acción recomendada, así como la fecha meta de terminación.
- 21) **Acciones tomadas:** Anotar una breve descripción de la acción actual y fecha de terminación.
- 22) **NPR resultante:** Se debe calcular y registrar el NPR resultante, multiplicando los valores de severidad, ocurrencia y detección una vez que se hayan tomado las acciones necesarias para corregir (5; 11; 12).

| FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS (PFMEA) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----------------------------------|----------------------------|---|---|--|------------------------------|-------|--|------------|--|---|-----|-----------------------|---|----------------|------------|-----------|---|
| Part Number: AT4E6051DA / AT4E6083DA AU3E6051DA / AU3E6083DA | | Item: GASKET CYLINDER HEAD | | Process Responsibility: Quality Engineering | | FMEA Number: 001-HG | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Key Date: April 01.13 | | Prepared By: R. Santillán | | | | | | | | | | | | |
| | | | | Model Year(s)/Program(s): 2016 | | FMEA Date: (Orig) 2013.03.01 | | (R e v.): | | Ene.16.13 (rev1) | | | | | | | | |
| Core Team : | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| J. Zepeda (Production Manager), E. Corona (Product Manager), Roland Mailander (Quality Manager), R. Santillán (Quality Engineer), A. Garduño (Auditor) G. Davila (Supervisor), E. Espinoza (Supervisor), V.Ortiz (Manager Maintenance), E. Jimenez (Tooling chief), J.Quintero (Process Engineering), A.Cardiel (Incoming Inspection) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| No. | Part. Number | Op. Nr. | Process Function / Requirements | Potential Failure Mode | Potential Effect(s) of Failure | Severity | Class | Potential Cause(s) / Mechanism(s) of Failure | Occurrence | Current Control | | RPN | Recommended Action(s) | Responsibility & Target Completion Date | Action Results | | | |
| | | | | | | | | | | Prevention | Detection | | | | Severity | Occurrence | Detection | |
| 1 | AT4E60516083DA AU3E60516083DA | 00 | Verify raw material for the Layers / In accordance with the invoice and Supplier's Quality Certificate. | Wrong identification or approval of non conformance material (different coil steel) | 1.Gasket does not seal, allowing combustion gas leakage to coolant [8] 2.Leakage in engine by Gasket material degradation leading to loss of bead height over time, loss of seal durability [8] 3.Reduced thermal efficiency due to degraded heat transfer [8] | 8 | | 1.-Raw Material without supplier's Quality Certificate 2.-Wrong supplier's shipment 3.-Incorrect raw material identification by inspector in EKM | 1 | 1.Instruction for Storage raw material 2.Quality Certifie for all each batch of raw material in incoming inspection | 1.100% Visual Verification of all incoming raw material in store in accordance with Purchase order and supplier's Quality Certificate 2.100% Visual verification of each incoming steel coil in cutting operation 3.Quality certificate from supplier | 5 | 40 | None in this time | | 8 | 1 | 5 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 2. 5. Ejemplo de desarrollo de un AMEF (11)

2.4 Análisis de Modo y Efecto de Variación (VMEA)

El VMEA es un método de ingeniería basado en estadísticas con la intención de guiar a los ingenieros para encontrar áreas críticas en términos de efectos de variación no deseados. Antes de hacer un VMEA, es necesario definir un conjunto de características del producto (PC's, por sus siglas en inglés) y seleccionar la (o las) de mayor interés desde el punto de vista de la variación.

Se define como Características Claves del Producto (KPC, por sus siglas en inglés) donde la variación no deseada puede tener un impacto substancial en la seguridad, costo final, conformidad con las regulaciones gubernamentales o requerimientos funcionales. Técnicas sistemáticas, como el Despliegue de la Función de Calidad (QFD), están disponibles para poder generar PC's (13).

Es bien conocido que la variación no deseada, tanto en los negocios como en la industria, es la mayor causa de los altos costos e insatisfacción de los clientes. Para trabajar de forma constante en temas relacionados con la variación o términos de calidad, las organizaciones se encuentran cada vez más estimulando la implementación de programas de Seis Sigma en sus procesos.

Seis Sigma despliega el pensamiento estadístico, métodos y herramientas de toda la organización, destinadas a analizar y reducir la variación no deseada optimizando cada parte del proceso para conseguir brindar un producto o servicio que cumpla los requisitos del cliente. Mientras que Seis Sigma se centra en la gestión de la variación en los procesos de fabricación, algunos autores sugieren el uso del diseño para Seis Sigma (DPSS) en el desarrollo del producto (14).

Los programas Seis Sigma y DPSS utilizan el Control del Proceso Estadístico (CPE) para monitorizar la variación durante los procesos de fabricación y la Metodología de Diseño Robusto (MDR) para hacer productos

insensibles a los Factores de Ruido (NF, por sus siglas en inglés) que surgen en la producción (variación unidad a unidad) o durante el uso del producto (condiciones medioambientales / de funcionamiento, desgaste / degradación). Tradicionalmente, el análisis de modo y efecto de falla (AMEF) también se incluye en los programas Seis Sigma y DPSS. Los ingenieros usan AMEF para identificar los posibles modos de falla y encontrar sus causas y determinar los efectos en el cliente. Sin embargo, las fallas son a menudo causadas por la variación. Esto puede demostrarse por el conocido sistema Load-Strength, ilustrado en la Figura 6. Si la resistencia nominal (f_0) es superior a la carga nominal (c_0), no debería ocurrir ninguna falla. Sin embargo, tanto la carga como la resistencia o ambos están generalmente afectados por una variación aleatoria sobre sus valores nominales. En consecuencia, pueden producirse fallos cuando una carga particularmente alta "satisface" una resistencia particularmente baja (15).

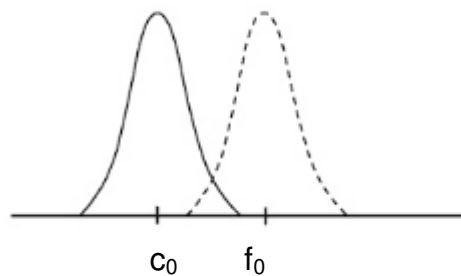


Figura 2. 6. Esquema de Carga-Fuerza (16)

Como la mayoría de los fallos son causados por variaciones no deseadas, es aconsejable centrarse directamente en la variación tan pronto como sea posible en el desarrollo del producto. Introduciendo el concepto de variación y abordando los riesgos relacionados en el desarrollo de productos no es nuevo en la literatura. Sin embargo, lo que falta hasta ahora es una herramienta práctica utilizada sistemáticamente para identificar, evaluar y gestionar las variaciones no deseadas. El Análisis de Modo y Efecto de Variación (VMEA) se desarrolla para llenar este vacío proporcionando a los

ingenieros un método de mejora de la calidad que es aplicable durante todo el proceso de desarrollo del producto (16).

El VMEA se puede dividir en tres diferentes niveles:

- 1- VMEA Básico, el cual es usado en las primeras etapas de diseño donde la información acerca de la variación es vaga y lo que se busca es comparar y evaluar diferentes conceptos.
- 2- VMEA Mejorado, el cual es usado después en las etapas de diseño donde más información se conoce sobre las fuentes de variación.
- 3- VMEA Probabilístico, el cual es usado a finales de las etapas de diseño donde la información detallada y estadística acerca de las fuentes de variación está disponible (13; 17; 18; 19).

El VMEA Básico y Mejorado, están basados en calificaciones subjetivas, en una escala del 1 al 10 similar al método AMEF. La VMEA Probabilística, por otra parte es un método basado en datos cuantitativos de resultados de pruebas u otras medidas disponibles, permitiendo gran objetividad. El método VMEA probabilístico apunta sistemáticamente a evaluar factores que afecten Características Claves del Producto (KPC), por lo que, la variable de respuesta es afectada por la variación (18).

El proceso de trabajo del VMEA consiste de 4 pasos: Desglose causal de KPC's, evaluación de la sensibilidad, evaluación del tamaño de la variación y evaluación del riesgo de variación y priorización (13).

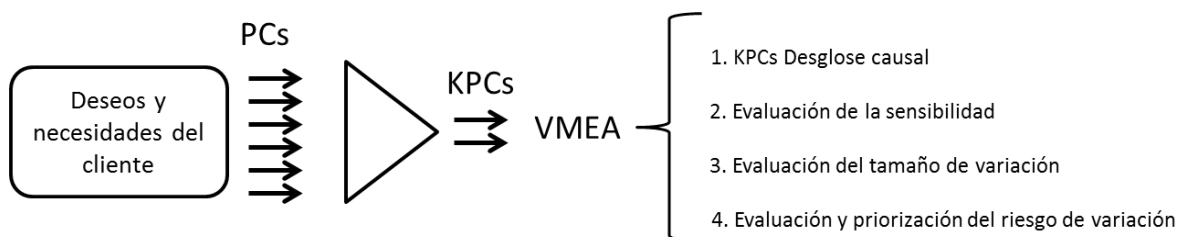


Figura 2. 7. Proceso de selección de KPC y VMEA (13)

2.5 Desarrollo del modelo teórico VMEA para análisis de respuesta

A partir de este punto se explica el desarrollo de la metodología una vez definida la operación por lo que se puede empezar por describir las etapas del VMEA y posteriormente explicar la KPC que se eligió para la operación de rolado de radios.

Primero hay que volver a mencionar, como se hizo anteriormente, sobre los tres niveles que hay en el VMEA y determinar con cual trabajar. Estos son VMEA Básico, Mejorado y Probabilístico (13; 17; 18; 19).

Para el caso de estudio de este proyecto se optó por desarrollar el VMEA Probabilístico, ya que se contaba con información del proceso (especificaciones del producto, matriz de características, plan de control, etc.) y posteriormente buscar, desarrollar y aplicar un modelo matemático para la solución de este método.

El VMEA es un método basado en estadística reportado por Johansson P. (13). Es usado para analizar el efecto de diferentes fuentes de variación sobre un proceso o producto específico. El proceso o producto de análisis posee una o varias salidas de respuesta que denominaremos (Y_i) , y esta respuesta es tratada como el objetivo de una función $g(x_i)$, una función de “n” variables o incluso como funciones subyacentes (x_1, x_2, \dots, x_n) , siendo los factores claves del proceso que alteran el valor de respuesta Y .

Por lo tanto $Y_i = g(x_i)$, la cual está determinada por la ecuación (2.1).

$$Y_i = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad \text{ec. (2.1)}$$

Utilizando la expansión de Taylor sobre los valores medios de las funciones subyacentes (x_1, x_2, \dots, x_n) , las cuales no son independientemente estocásticas, entonces es posible utilizar la siguiente expresión para la varianza

en Y_i , como se muestra en la ecuación (2.2); cuando se estima que es posible obtener las medias de variación y los coeficientes de sensibilidad.

$$Var [Y_i] = c_1^2 \cdot \sigma_{x1}^2 + c_2^2 \cdot \sigma_{x2}^2 + \dots + c_n^2 \cdot \sigma_{xn}^2 + Covarianza \quad \text{ec. (2.2)}$$

Donde C_i representa el coeficiente de sensibilidad, y σ_{xi} representa la varianza del factor de ruido x_i .

Una vez que se definió que tipo de VMEA se empezará a trabajar, se debe definir cuáles son las Características del Proceso (PC) desde el punto de vista de la variación, y después determinar cuáles serán las Características Clave del Proceso (KPC) en donde se busca encontrar cual KPC podría provocar mayor variación no deseada que pudiera tener impacto sustancial en la seguridad, costo final, regulaciones gubernamentales o requerimientos funcionales (13), que, como se mencionará más adelante en el capítulo 3, para este proyecto se enfocó en el aspecto de la seguridad, en el desempeño en campo, del componente muñón de dirección.

La estructura general para el VMEA consiste en cuatro pasos como se comentó anteriormente:

1. *Desglose causal de Características clave del proceso (KPC's)*
2. *Evaluación de los coeficientes de sensibilidad (c_i)*
3. *Evaluación del tamaño de la varianza (σ_{xi}) y riesgo (r_i)*
4. *Evaluación del Número de Prioridad de Riesgo en la Variación (VRPNI)*

2.5.1 Paso 1: Desglose causal de KPC's

El desglose causal del KPC es el primer paso en facilitar y entender la variación. Una vez que la KPC es seleccionada, puede ser descompuesta en un número de sub-elementos llamados Sub-KPC's. Las Sub-KPC's son

características ya sea del producto o los componentes del producto o del proceso de manufactura cuyos valores afectan la KPC que a su vez son afectadas por uno o más NF's.

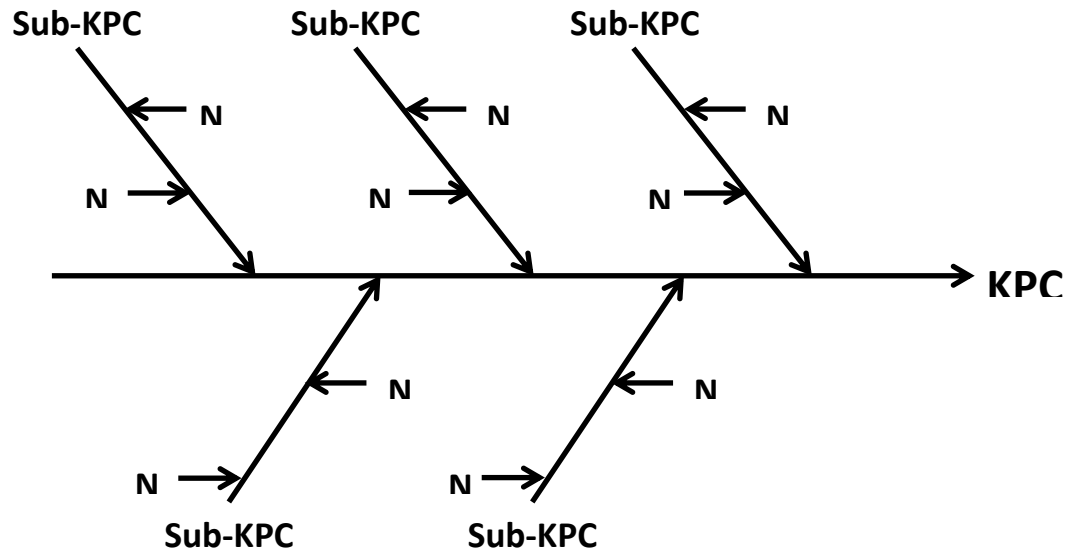


Figura 2. 8. Desglose de KPC en Sub-KPC y NF's

2.5.2 Paso 2: Evaluación de sensibilidad

En el Segundo paso del procedimiento, los ingenieros evalúan la sensibilidad del KPC para la influencia de cada Sub-KPC y la sensibilidad de cada Sub-KPC para la influencia de los NF's. Para evaluar la sensibilidad, los ingenieros pueden usar medidas objetivas o evaluaciones subjetivas, especialmente en las fases más tempranas del desarrollo del producto y/o proceso, se propone utilizar criterios de evaluación subjetiva para la captura del conocimiento de los ingenieros sobre la sensibilidad. La evaluación está basada en una escala del 1 al 10, donde el 1 corresponde a una sensibilidad muy baja y el 10 a una sensibilidad muy alta. Los criterios están dados en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Criterios para la evaluación de la sensibilidad KPC's

| Variación de NF | Criterios para evaluar la sensibilidad | Puntuación |
|------------------------|--|-------------------|
| Muy bajo | La variación del NF (alternativamente de Sub-KPC) no es (casi) del todo transmitida al Sub-KPC (alternativamente a KPC) | 1 - 2 |
| Bajo | La variación del NF (alternativamente de Sub-KPC) es transmitida al Sub-KPC (alternativamente a KPC) en grados pequeños | 3 - 4 |
| Moderado | La variación del NF (alternativamente de Sub-KPC) es transmitida al Sub-KPC (alternativamente a KPC) en grados moderados | 5 - 6 |
| Alto | La variación del NF (alternativamente de Sub-KPC) es transmitida al Sub-KPC (alternativamente a KPC) en grados altos | 7 - 8 |
| Muy alto | La variación del NF (alternativamente de Sub-KPC) es transmitida al Sub-KPC (alternativamente a KPC) en grados muy altos | 9 - 10 |

El segundo paso en el proceso del VMEA es establecer como los Sub-KCP afectan la función del objetivo, calculando el coeficiente de sensibilidad

Se deben tener definidos cuáles son los NF's que afectan la función del objetivo (KPC) que serán evaluados para encontrar por lo que posteriormente se deben calcular los coeficientes de sensibilidad. Para determinar los valores de los coeficientes de sensibilidad se corre un análisis de varianzas (ANOVA) para definir el peso de cada variable así como también ver la relación entre cada una de ellas.

A través de la función de respuesta $g(x)$ se puede derivar parcialmente con respecto a cada variable x_i y obtener de manera analítica el valor de coeficiente de sensibilidad de acuerdo a la ecuación (2.3).

$$C_i = \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right) \bigg|_{\mu_i} \quad \text{ec. (2.3)}$$

Otra manera, es usando un análisis cualitativo, como se mostró en la tabla 2.2, estableciendo los valores de peso atribuidos a cada variable x_i como factor de ruido y ponderar de acuerdo a la ecuación (2.4)

$$C_i = \frac{\sum_{k=1}^3 X_{k,i} * k}{N_i} \quad \text{ec. (2.4)}$$

2.5.3 Paso 3: Evaluación del tamaño de la variación

En el tercer paso, los ingenieros examinan los NF's y evalúan la magnitud de su variación en condiciones de operación. En la Tabla 2.3 se propone (13) criterios de evaluación subjetiva para la captura del conocimiento de los ingenieros sobre la magnitud de una variación de NF. La evaluación está basada en una escala del 1 al 10, donde el 1 corresponde a una variación muy baja y el 10 a una variación muy alta.

Tabla 2. 3. Criterios para la evaluación de la variación de NF

| Variación de NF | Criterios para evaluar la variación de NF | Puntuación |
|-----------------|---|------------|
| Muy bajo | El NF es considerado de ser casi constante en todas las posibles condiciones | 1 - 2 |
| Bajo | El NF presenta pequeñas fluctuaciones o se encuentra dentro de un pequeño intervalo en todas las condiciones posibles | 3 - 4 |
| Moderado | NF presenta fluctuaciones visibles pero moderadas en todas las condiciones | 5 - 6 |
| Alto | NF presenta fluctuaciones visibles y altas en todas las condiciones | 7 - 8 |
| Muy alto | NF presenta fluctuaciones muy altas en todas las condiciones | 9 - 10 |

Para determinar el tamaño de la variación y encontrar la expresión de varianza de acuerdo a la ecuación (2.5). Es posible definir una distribución discreta para X_i , basado sobre la clasificación de la probabilidad determinada, p . Donde el valor de p es una ponderación del desempeño del parámetro en sus diferentes niveles, obteniendo un promedio de la muestra μ_i de acuerdo a la ecuación (2.6) y (2.7). Considerando la información disponible para calcular las varianzas de X_i , entonces es calculado con la ecuación (2.8).

La variación del riesgo r_i es posible determinarla a través de la ecuación (2.9), donde se obtiene un cociente de la variación de x con respecto al promedio de datos de la muestra μ_i .

$$\sigma_{xi}^2 = Var [X_i] \quad \text{ec. (2.5)}$$

$$\mu_i = E [X_i] \quad \text{ec. (2.6)}$$

$$\mu_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij} \quad \text{ec. (2.7)}$$

$$\sigma_{xi}^2 = \sum_{j=1}^n p_{ij} * (x_{ij} - \mu_i)^2 \quad \text{ec. (2.8)}$$

Por tanto el riesgo puede ser estimado con la siguiente expresión:

$$r_i = \frac{\sigma_{xi}}{\mu_i} \quad \text{ec. (2.9)}$$

2.5.4 Paso 4: Evaluación y priorización del riesgo de variación

A partir de las evaluaciones descritas en los tres pasos anteriores, el Número de Prioridad de Riesgo en la Variación (VRPN, por sus siglas en inglés) se calcula para los NF's con respecto a cada Sub-KPC.

$$VRPN_{\text{Sub-KPC}} = S_1^2 S_2^2 V^2 \quad \text{ec. (2.10)}$$

Aquí S_1 es la sensibilidad del KPC para la influencia del Sub-KPC afectado por el NF (evaluado en el paso 2), S_2 es la sensibilidad del Sub-KPC para la influencia del NF (evaluado en el paso 2) y V es el tamaño de la variación del NF (evaluado en el paso 3). Si el mismo Sub-KPC es influenciado por varios NF's, es posible calcular un VRPN para ese Sub-KPC sumando el $VRPN_{\text{NF}}$ calculado con respecto a ese Sub-KPC.

$$VRPN_{\text{Sub-KPC}} = \sum NPRV_{FR} \quad \text{ec. (2.11)}$$

Estos VRPN's proporcionan una base para un diagrama de Pareto, dando como resultado la priorización de sub-KPC's y NF's basados en su contribución a la variabilidad total del KPC. El diagrama de Pareto es importante para seleccionar las áreas de producto que requieren la mayor atención. Esto podría implicar acciones dirigidas a eliminar algunas de las fuentes de variación o aumentar la robustez de las características del producto a las fuentes de variación (16).

A partir del VMEA, la variación total se puede calcular tomando la suma del VRPN de cada parámetro. Este valor de la variación total es difícil de interpretar siempre y cuando el análisis provenga de cifras subjetivas y no de valores físicos. Sin embargo, el resultado da una posibilidad para comparaciones relativas entre los sub-KPC's (19).

En el caso de que los valores vengan de datos reales, el número de priorización de riesgo (VRPN) es calculado para cada sub-KPC de acuerdo a la ecuación (2.12), una expresión ampliada de esta es sustituir la ecuación (2.9), resultando en el múltiplo del coeficiente de sensibilidad por el cociente de la varianza promedia, como se muestra en la ecuación (2.13).

$$VRPN_i = C_i^2 * r_i^2 \quad \text{ec. (2.12)}$$

Por lo tanto:

$$VRPN_i = C_i^2 * \left[\frac{\sigma_i}{\mu_i} \right]^2 \quad \text{ec. (2.13)}$$

La evaluación del número de priorización de riesgo determina un orden de relevancia de afectación de los parámetros clave del proceso, que se puede enlistar de mayor a menor afectación. De esta manera se pueden atacar los parámetros X_i que mayor contribuyen a la respuesta deseada en la función "Y" de la ecuación (2.1).

2.6 Otros Métodos para Análisis Estadísticos

2.6.1 Análisis de Varianza (ANOVA)

Un ANOVA es una herramienta de análisis usada en estadística que prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula (H_0) establece que todas las medias de la población (medias de los niveles de los factores) son iguales mientras que la hipótesis alternativa (H_1) establece que al menos una es diferente (20).

Este contraste es fundamental en el análisis de resultados experimentales, en los que interesa comparar los resultados de K “tratamientos” o “factores” con respecto a la variable dependiente o de interés, por lo que, para ejecutar un ANOVA, se debe cumplir con los siguientes supuestos (21):

- Las poblaciones (distribuciones de probabilidad de la variable dependiente correspondiente a cada factor) son normales.
- Las K muestras sobre las que se aplican los tratamientos son independientes,
- Las poblaciones tienen todas igual varianza.

Tipos de ANOVA

- De un solo factor: Un factor fijo (niveles establecidos por el investigador) que puede tener un número desigual (no balanceado) o igual (balanceado) de observaciones por tratamiento.
- Balanceado: El modelo puede contener cualquier número de factores aleatorios y fijos (los niveles se seleccionan de manera aleatoria) y factores anidados y cruzados, pero requiere un diseño balanceado.
- Modelo lineal general: Expande los ANOVA balanceados al permitir diseños no balanceados y covariables (variables continuas).

Las expresiones para el cálculo de los elementos que intervienen en el Anova son las siguientes (22):

- Media Global: $\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} x_{ij}}{n}$ ec. (2.14)

- Variación Total: $SCT = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X})^2$ ec. (2.15)

- Variación Intra-grupos: $SCD = \sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{X}_j)^2$ ec. (2.16)

- Variación Inter-grupos: $SCE = \sum_{j=1}^K (\bar{X}_j - \bar{X})^2 n_j$ ec. (2.17)

Siendo x_{ij} el i -ésimo valor de la muestra j -ésima; n_j el tamaño de dicha muestra y \bar{X}_j su media.

2.6.2 Metodología de Superficie de Respuesta (RSM)

La metodología RSM (por sus siglas en inglés Response Surface Methodology) es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas para la construcción de modelos empíricos. Mediante el diseño cuidadoso de los experimentos, el objetivo es optimizar una respuesta (variable de salida) que está influenciada por varias variables independientes (variables de entrada). Un experimento es una serie de pruebas, llamadas “corridas”, en el que se realizan cambios en las variables de entrada con el fin de identificar las razones de los cambios en la respuesta de salida (23).

Donde mayor se encuentra las aplicaciones de RSM es en el mundo industrial, situaciones en las que varias variables de entrada influyen potencialmente en alguna medida de rendimiento o característica de calidad del producto o proceso. Esta medida de rendimiento o característica de calidad es llamada respuesta. Normalmente se mide en una escala continua, aunque las respuestas de atributos, filas y las respuestas sensoriales no son inusuales. La mayoría de las aplicaciones en mundo real utilizando RSM pueden implicar más de una respuesta. Las variables de entrada a veces se denominan variables

independientes y están sujetas al control del ingeniero o científico, al menos para propósitos de una prueba o un experimento (24).

Esta metodología consiste en un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas utilizadas en el desarrollo de una relación funcional adecuada entre una respuesta de interés, y , y un número de variables de control (entrada) asociadas, indicadas por, x_1, x_2, \dots, x_k . En general, tal Relación es desconocida, pero puede ser aproximada por un modelo polinomial de bajo grado de la forma (25)

$$y = f'(x)\beta + \epsilon \quad \text{ec. (2.18)}$$

Donde $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)'$, $f'(x)$ es un función vectorial de p elementos que consiste en poderes y producto cruzados de poderes de x_1, x_2, \dots, x_k hasta cierto grado denotado por $d (\geq 1)$, β es un vector de p coeficientes constantes desconocidos denominados parámetros, $y \in$ es un error experimental aleatorio que se supone que tiene una media de cero.

2.6.3 Diseño de experimentos (DOE)

La metodología de diseño de experimentos (DOE) es una herramienta estadística para la mejora de la calidad usada frecuentemente en proyectos Seis Sigma. Esta metodología sirve para diseñar las condiciones ideales de un producto, proceso o servicio para que cumpla con nuestras expectativas usando el mínimo número de experimentos o pruebas. DOE es muy útil cuando tenemos entre manos un producto complicado cuyo resultado puede depender de una gran cantidad de variables que no controlamos y que debemos ajustar para optimizarlo (26).

El diseño estadístico de experimentos es la forma más eficaz de hacer pruebas en los procesos. Al realizar pruebas controladas y relacionadas con el

proceso así como establecer un método en la secuencia de aplicación podemos obtener datos que estadísticamente pueden proporcionarnos conclusiones comprobables del proceso o sistema. El diseño de experimentos es precisamente la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso (27).

Algunos problemas típicos que se pueden resolver mediante DOE son (28):

- Comparar diferentes tipos de material y elegir el más adecuado para su proceso.
- Comparar varios instrumentos de medición y verificar si trabajan con niveles similares de precisión y exactitud.
- Determinar cuáles variables de proceso afectan (y de qué forma) las características de calidad del producto.
- Encontrar condiciones de operación adecuadas para el cumplimiento de las especificaciones del producto final.
- Reducción de tiempos de ciclo. Apoyar al diseño de nuevos productos.

2.6.4 Design Expert - software especializado para el desarrollo de DOE

Design Expert es un software que se utiliza para ayudar con el diseño e interpretación de experimentos de factor múltiple. El software ofrece una amplia gama de diseños, incluidos los factoriales, los factoriales fraccionarios y los diseños compuestos. Design Expert también ofrece diseños generados por computadora para casos en los que los diseños estándar no se pueden aplicar, o, por ejemplo, en los que se desea aumentar un diseño existente para adaptarse a un modelo más flexible (29).

Dentro de las herramientas estadísticas con las que cuenta la v10 (utilizada en este proyecto), se tienen (30):

- Diseños de evaluación factoriales de dos niveles: identifica los factores vitales que afectan el proceso o producto para poder realizar mejoras innovadoras.
- Estudios factoriales generales: obtiene la mejor combinación de factores categóricos, como la fuente versus el tipo de suministro de materia prima.
- Métodos de superficie de respuesta (RSM): encuentra la configuración de proceso óptima para lograr el máximo rendimiento.
- Técnicas de diseño de mezclas: descubre la combinación ideal para la formulación del producto.
- Encuentra y formula: combinaciones de factores de proceso, componentes de mezcla y factores categóricos.
- Diseño y análisis: facilita la experimentación mediante la agrupación de factores de proceso y/o componentes de mezcla difíciles de cambiar.

CAPÍTULO 3

CONSIDERACIONES DEL PROCESO DE MANUFACTURA: MUÑÓN PARA EJE DE DIRECCIÓN

3.1 Especificaciones del producto. Muñón para eje de dirección

Como se comentó en el capítulo 1, el muñón (ver Figura 3.1) viene a ser un componente de la suspensión delantera el cual tiene la función de apoyo en las ruedas y les permite girar. Este componente es considerado como uno de los más críticos en la suspensión automotriz ya que es sometido a cargas variables durante el tiempo de su vida útil, lo que conduce a un fallo por fatiga (31; 32; 33).



Figura 3. 1. Componente Muñón para eje frontal (32)

El material con el que se trabajó para este proyecto es de una composición comercial exclusiva de la empresa, por lo que se cuenta con una composición química de referencia similar al acero AISI serie 4XX, del cual se describe a continuación:

3.1.1 Características generales del acero AISI 4XX

El acero de aleación 4XX es un acero de baja aleación que contiene cromo y molibdeno como reforzadores. La aleación es capaz de ser tratada térmicamente a buenos niveles de resistencia mientras que mantiene una tenacidad razonable (34; 35).

Tabla 3. 1. Composición Química AISI 4XX (35)

| Elemento | | Contenido (%) |
|-----------|----|---------------|
| Carbono | C | 0.30 - 0.40 |
| Manganeso | Mn | 0.50 - 1.00 |
| Silicio | Si | 0.10 - 0.40 |
| Cromo | Cr | 0.70 - 1.20 |
| Molibdeno | Mo | 0.10 - 0.30 |
| Fósforo | P | 0.035 max |
| Azufre | S | 0.040 max* |

3.1.2 AISI 4XX Forja

El acero de aleación de grado AISI 4XX se forja a una temperatura de alrededor de 2200°F (1205°C). La aleación puede enfriarse lentamente después de forjarse o transferirse a un horno manteniendo, a lo que puede ser, la temperatura de forjado de acabado. Un tratamiento de este tipo equivaldría a un tipo de tratamiento de recocido.

3.1.3 Aplicaciones y propiedades de forja

Esta aleación encuentra aplicaciones en las industrias aeroespacial, petrolera y de gas, automotriz y de defensa. Se utiliza en la producción de ejes forjados, husillos, accesorios, plantillas y collares.

Tabla 3. 2. Propiedades del acero 4XX (35)

| Propiedades | Métrico | Inglés |
|--|------------------------|--------------------------------------|
| Densidad | 7.85 g/cm ³ | 0.284 lb/in ³ |
| Módulo de elasticidad | 190-210 GPa | 27557-30458 ksi |
| Módulo de Masa (típico para el acero) | 140 GPa | 20300 ksi |
| Módulo de Corte (típico para el acero) | 80 GPa | 11600 ksi |
| Coeficiente de Poisson | 0.27-0.30 | 0.27-0.30 |
| Dureza, Brinell | 187-229 | 187-229 |
| Dureza, Knoop | 230 | 230 |
| Dureza, Rockwell B | 94 | 94 |
| Dureza, Rockwell C | 15 | 15 |
| Dureza, Vickers | 218 | 218 |
| Maquinabilidad | 70 | 70 |
| Conductividad Térmica | 42.7 W/Mk | 296 BTU in/hr.ft ² .°F |

3.1.4 Tratamiento térmico

Recocido: Para una maquinabilidad óptima, este grado de acero debe ser recocido para dar una microestructura de perlita gruesa con un mínimo de ferrita. A partir de una temperatura de austenitización de 855°C, el acero se enfría a 760°C y luego a 665°C a 19°C por hora, o a 675°C y se mantiene durante 4 horas para un isoanel. En ambos casos el paso final es un aire frío.

Normalización: Este acero se normaliza a 1600°F (870°C) seguido de refrigeración por aire.

Endurecimiento: El acero será austenitizado a 1550 - 1600 °F (845 - 870 ° C) seguido de agua o aceite de enfriamiento, dependiendo del tamaño y la complejidad de la sección.

Templado: El acero será templado a temperaturas que cumplan con las propiedades mecánicas requeridas, basado en la experiencia pasada.

Maquinabilidad: Este grado es fácilmente mecanizable después del tratamiento térmico correcto y apropiado.

Soldabilidad: El acero puede ser soldado por métodos de fusión normales, pero sólo en condiciones recocidas o normalizadas. El acero no se debe soldar siguiendo las operaciones de endurecimiento y revenido. El precalentamiento y post-calentamiento pueden llegar a ser necesario.

3.2 Tecnologías del proceso de maquinado actual (operaciones)

Para el desarrollo de este producto / componente se necesita llevar a cabo una serie de procedimientos (operaciones) para cumplir con las necesidades preestablecidas por parte del cliente. A continuación se hablará acerca de las operaciones que conforman el proceso del muñón:

Fresado: El fresado consiste en maquinar circularmente superficies de formas variadas. Este trabajo se efectúa con una herramienta de corte llamada fresa. El movimiento de rotación de la fresa se llama movimiento principal o de corte. Para conseguir el espesor de viruta ejecuta la pieza un movimiento de avance lineal. Los movimientos principal y de avance son originados por la máquina fresadora (36).

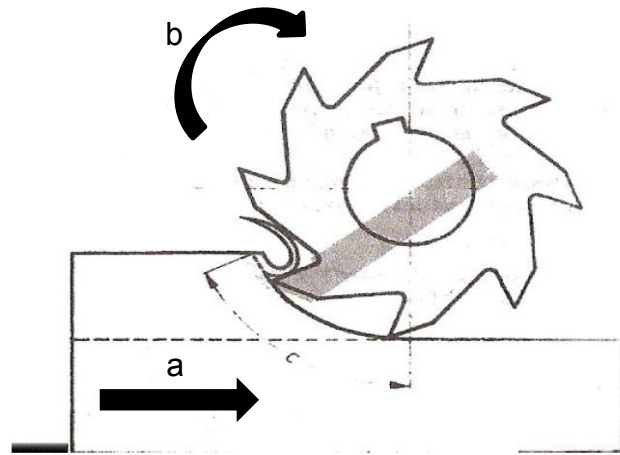


Figura 3. 2. Proceso de fresado. a) Movimiento de avance y b) Movimiento de corte (36)

Torneado: Es un procedimiento para crear superficies de revolución por arranque de viruta. Llamamos superficies de revolución a aquellas en las que si hacemos un corte por un plano perpendicular a su eje, la sección es circular. La máquina que se utiliza para el torneado se denomina torno. A partir de aquí la pieza a mecanizar irá amarrada a un sistema de fijación (plato de garras, pinza, plato liso,...) y tendrá movimiento rotatorio y la herramienta de corte irá fijada a un soporte o torreta y se desplazará en las dos direcciones indicadas para proceder al arranque de material. Además el movimiento de los ejes del torno puede ser totalmente manual o semiautomático, o puede estar gobernado por un CNC (37).

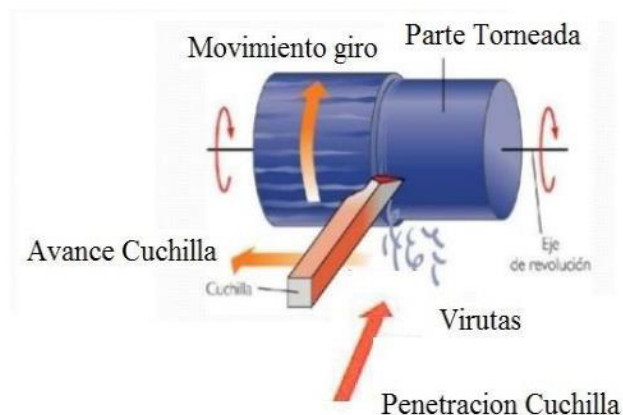


Figura 3. 3. Proceso de torneado (38)

Maquinado: El maquinado es un proceso que se basa en remover por medio de una herramienta de corte todo el exceso del material, de tal forma que la pieza terminada sea realmente la deseada. El proceso de maquinado incluye la deformación cortante del material, creando una viruta, cuando esta es removida, queda totalmente expuesta a una nueva superficie. El mecanizado se hace mediante una máquina-herramienta, manual, semiautomática o automática, pero el esfuerzo de mecanizado es realizado por un equipo mecánico, con los motores y mecanismos necesarios. Las máquinas herramientas de mecanizado clásicas son (39):

- Taladro
- Limadora
- Mortajadora
- Cepilladora
- Brochadora
- Torno
- Fresadora

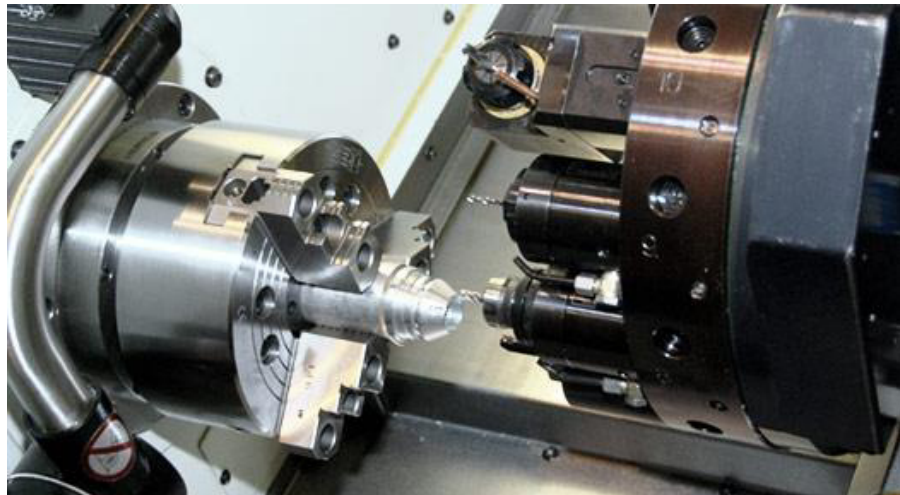


Figura 3. 4. Herramientas en un centro de maquinado (40)

Temple por inducción: Este proceso consiste en enfriar de manera controlada piezas de acero previamente calentadas a temperaturas superiores a 800°C. Para este tipo de temple se utilizan bobinas de cobre fabricadas a medida de la zona a calentar. Estas bobinas están conectadas, se puede programar la entrega de potencia (kW) y frecuencia de corriente (Hz). Al hacer circular un campo magnético alterno por estas bobinas (inductores) obligamos a la pieza tratada a comportarse como un electroimán que se opone al flujo magnético natural (Corriente de Foucault), fenómeno que se traduce en generación de calor por efecto Joule de manera controlada. Una vez calentada la pieza gracias a un correcto diseño de bobina de la pieza y control de todos los parámetros del generador, empieza la fase de enfriamiento. En inducción siempre se utilizan medios líquidos basados en agua desmineralizada mezclada a diferentes % de polímeros, según requiera cada pieza (41).

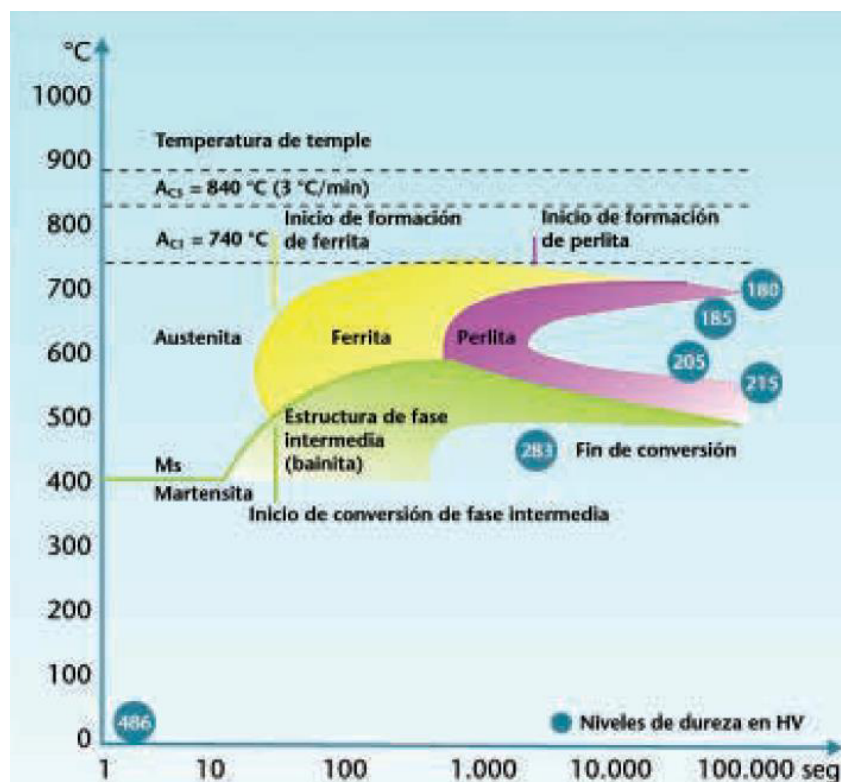


Figura 3. 5. Diagrama TTT continuo (41)

Revenido: Es un tratamiento térmico a baja temperatura que se realiza normalmente después de un proceso de temple con el objetivo de alcanzar la proporción de dureza y resistencia deseada. La temperatura de revenido puede variar, dependiendo de los requisitos y el grado de acero, entre 160 y 500 °C o una temperatura superior. El revenido se realiza normalmente en los hornos de revenido, que se pueden equipar con gas protector opcional. El gas protector impedirá que la superficie se oxide durante el proceso, y se utiliza principalmente para temperaturas de revenido más elevadas. Para algunos tipos de acero, el tiempo de mantenimiento a la temperatura de revenido es de gran importancia; un tiempo de mantenimiento más prolongado corresponderá a una temperatura de revenido superior. Dependiendo del grado de acero y a determinados intervalos de temperatura, puede producirse un fenómeno conocido como fragilización por revenido. Normalmente, el revenido dentro de este intervalo de temperaturas debe evitarse (42; 43).

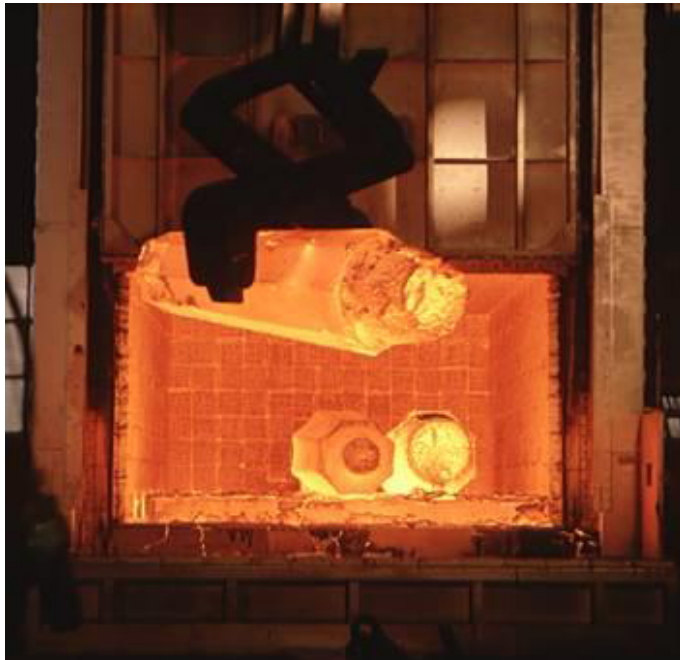


Figura 3. 6. Proceso de revenido (43)

Brochado: Es un procedimiento de mecanizado por arranque de viruta cuya herramienta se denomina brocha, tiene forma de barra y su superficie está

provista de múltiples dientes. La operación de brochado consiste en hacer pasar la brocha, forzadamente, por un orificio cilíndrico o por la superficie exterior de la pieza, con el fin de obtener progresivamente el perfil de la brocha empleada. Es la operación que consiste en arrancar lineal y progresivamente la viruta de la superficie de un cuerpo (44).

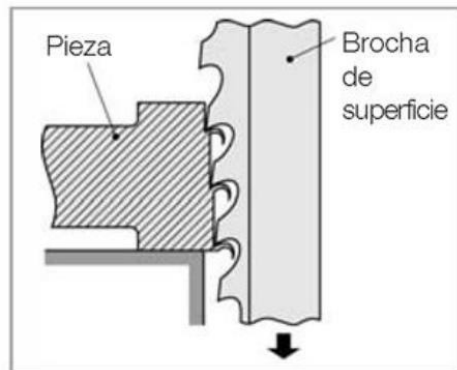


Figura 3. 7. Proceso de brochado (44)

Rectificado: Es una operación de mecanizado en la que una herramienta llamada muela arranca virutas cortas y delgadas obteniendo superficies con un grado de terminación superficial, exactitud de forma geométrica y precisión dimensional generalmente superiores a las obtenidas mediante el torneado, el cepillado o el fresado (45).

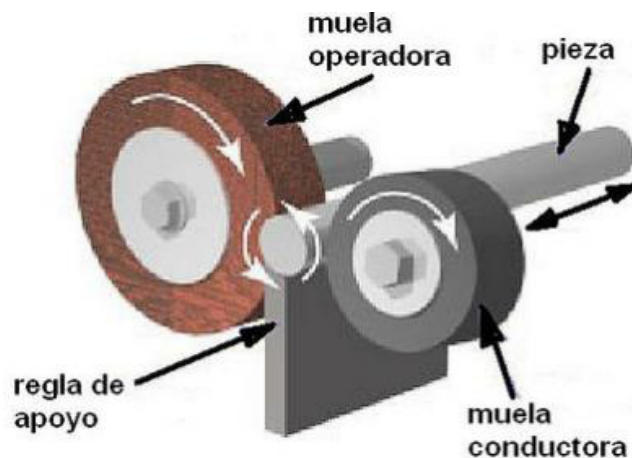


Figura 3. 8. Proceso de rectificado (46)

Rolado de radios: Consiste en la aplicación de una deformación plástica superficial que mejora el acabado de las piezas y que incrementa la dureza superficial, la resistencia a la fatiga, al desgaste y a la corrosión. La superficie del componente se trabaja en frío con uno o varios rodillos muy pulidos. Este proceso se puede aplicar solo o en combinación con otros procesos de acabado, como rectificado, asentado y lapeado (47; 48).



Figura 3. 9. Proceso de rolado (49)

3.3 Determinar las tecnologías núcleo del proceso de muñón de dirección

Para este paso se utilizó la ayuda de ingenieros de producción, calidad y materiales, así como también, documentación ya existente dentro de la empresa, para poder determinar las tecnologías con mayor impacto en el proceso del componente muñón.

Cuando se hace referencia a “mayor impacto en el proceso” quiere decir a las operaciones que cuentan con un mayor riesgo de seguridad para el consumidor final, que como se había comentado anteriormente, el muñón es parte crítica del eje delantero el cual permite dar dirección a las llantas.

El primero paso fue revisar el layout (Figura 3.10) y diagrama de flujo del proceso para conocer la serie de operaciones y así poder clasificarlas más adelante en operaciones núcleo.

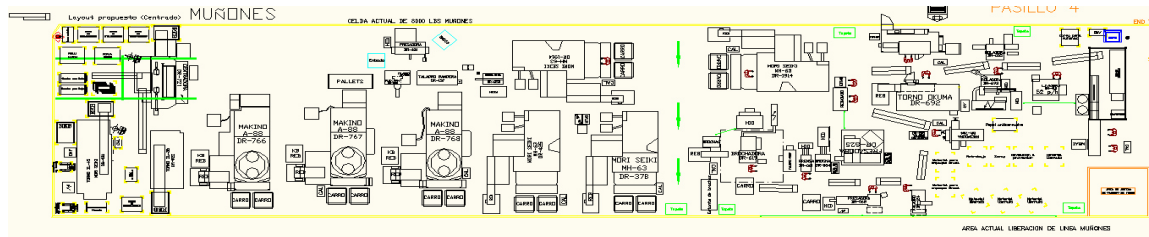


Figura 3. 10. Layout del proceso de muñón

El segundo paso fue identificar dentro de la matriz de características de cada operación, cuáles eran las más críticas tomando en consideración las características de calidad que se evalúan de acuerdo a las necesidades preestablecidas por el cliente y, a partir de ahí, empezar a descartar operaciones que no cuentan con clasificación de seguridad (ver Figura 3.11) y que por lo tanto no representan un alto peso en el desempeño del componente.

| A | B | C | D | E |
|------|---------------|-------------|--|---------------------------------|
| Item | Clasificación | Fuente | Característica | Especificación |
| 1A | Menor | PROCESO | Diametro de centros | 0.423" |
| 1B | Mayor | PROCESO | Dimension de proceso (2 Lugares) | 3.180" |
| 1E | Mayor | PROCESO | Diferencia de Longitud No mayor a 0.040" | 0.040" |
| 1C | Menor | PROCESO | Run out (Espiga) | 0.060" |
| 1D | Menor | PROCESO | Run out (Brida) | 0.060" |
| 1A | Seguridad | QCC | (QCC-SRC-25) Diametro para rosca | 1.494" |
| 1B | Menor | PROCESO | Diam. para balero exterior | 1.776" |
| 1C | Menor | PROCESO | Diam. para balero interior | 2.649" |
| 1D | Menor | PROCESO | Diametro para reten | 3.528" |
| 1E | Mayor | QCC | (QCC-1) Diametro Piloto | 5.495" |
| 1F | Seguridad | QCC | (QCC-SRC-25) P.D. rosca del 500" - 12 UNF | 1.4435" |
| 1G | Mayor | QCC | (QCC-30) Dimension del hombro de balero al final de la rosca | 5.990" |
| 1H | Mayor | PROCESO | Espesor de brida | 0.587" |
| 1J | Menor | NO / LAYOUT | Dimension de proceso | 0.045" |
| 1K | Menor | NO / LAYOUT | Radio | 0.090" |
| 1M | Mayor | PROCESO | Dimension total del hombro de balero al final de la espiga | 7.540" |
| 1N | Mayor | PROCESO | Run out del diametro piloto | 0.010" |
| 1N1 | Mayor | QCC | (QCC-11) Run out de la cara de brida maquinada. | 0.010" |
| 1O | Mayor | PROCESO | Run out diametro del balero interior | 0.005" |
| 1O1 | Mayor | PROCESO | Run out diametro del balero exterior | 0.005" |
| 1P | Mayor | PROCESO | Dimension de proceso del hombro del diametro para el sello al hombro del diametro para el piloto | 0.731" |
| 1Q | Mayor | PROCESO | Dimension de proceso del hombro del diametro del sello a la superficie de la brida | 1.041" |
| 1R | Menor | NO / LAYOUT | Chaffán en espiga roscada (Rosca a chaffán) | 0.080" |
| 1S | Mayor | NO / LAYOUT | Diametro de la brida maquinada | Tabla Anexa |
| 1A | Mayor | PROCESO | Fresado exterior total | 10.6965" |
| 7A | Mayor | PROCESO | Fresado Exterior (Enhanced Knuckle) | 10.077" |
| 7B | Mayor | NO / LAYOUT | Diametro Ø3.150" (Enhanced Knuckle) | 3.150" |
| 7C | Mayor | NO / LAYOUT | Dimension (Enhanced Knuckle) | 1.500" |
| 1B | Mayor | PROCESO | Diametro de K.P. | 1.902" |
| 1D | Menor | NO / LAYOUT | Diametro del chaffán | 1.970" |
| 1E | Mayor | PROCESO | Diametro de agujero para tapa del king pin | 0.2745" |
| 1F | Mayor | PROCESO | Profundidad | 0.960" |
| 1G | Menor | NO / LAYOUT | Posicion correcta | 0.020" |
| 2A | Mayor | QCC | (QCC-9) Diametro de agujeros de brida | Tabla Anexa |
| 2B | Mayor | QCC | (QCC-9) Posición correcta | 0.026" |
| 2C | Mayor | NO / LAYOUT | P.D rosca 3/4" - 10 UNC-2B | 0.6889" |
| 2F | Menor | NO / LAYOUT | Espesor de cajeado | 0.863" |
| 2E | Menor | NO / LAYOUT | Posicion del tornillo de tope | 0.030" |
| 2G | Mayor | NO / LAYOUT | Diametro para -ABS- | Tabla Anexa |
| 2H | Mayor | NO / LAYOUT | Posicion del -ABS- | 0.026" |
| 2I | Menor | NO / LAYOUT | Diametro Conter Bore -ABS- | 1.750" |
| 2J | Menor | NO / LAYOUT | Espesor de cajeado -ABS- | 0.455" |
| 3A | Mayor | QCC | (QCC-16) Angulo del king pin | 6° 30" |
| 3B | Mayor | QCC | (QCC-14) Distancia de KPI a IBS | 4.188" |
| 3D | Mayor | NO / LAYOUT | Posicion de agujeros conicos | 7.0884"/3.0986" 5.8183"/4.4622" |
| 3A | Mayor | QCC | (QCC-8) Diametro del agujero conico mayor | 1.550" |
| 3F | Mayor | NO / LAYOUT | (QCC-8) Diametro del agujero conico mayor (Enhanced Knuckle) | 1.675" |
| 3B | Mayor | QCC | (QCC-8) Diametro del agujero conico menor | 1.425" |
| 3C | Seguridad | QCC | (QCC-SRC-7) Espesor de pared minima. | 0.190" |
| 3E | Mayor | QCC | (QCC-13) Espesor de patas | 2.5" |

Figura 3. 11. Ejemplo de Matriz de características

Al determinar cuáles eran las operaciones que contaban con grados de seguridad se determinó en conjunto con los ingenieros, cuál de las operaciones, debido a su experiencia, era la mejor opción para empezar el desarrollo de la metodología y así empezar a definir los parámetros críticos con lo que se trabajarán. Otro punto que también influyo en la decisión, fue el tiempo de ciclo de vida de la máquina, por lo que al final se optó por elegir la operación de rolado de radios.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA PARA EL MAPA TECNOLÓGICO DE PROCESOS DE MANUFACTURA

Para el desarrollo del capítulo 4, se explica a detalle el procedimiento sobre el desarrollo de las pruebas experimentales obtenidas del caso de estudio, definido en el planteamiento del problema como el proceso de manufactura del “Muñón de Dirección” que se tomará como punto de partida. Este trabajo de investigación, propone el establecimiento de la Metodología para el Mapa Tecnológico de Procesos de Manufactura (MPTM) para la empresa SISAMEX, como un estándar que posteriormente pueda implementarse en cualquiera de los procesos de manufactura de la empresa.

Como parte del desarrollo de este capítulo se describirán los 4 puntos que se llevaron a cabo en la realización del proyecto en la obtención de parámetros óptimos para la operación de rolado de radios del componente Muñón de Dirección.

- a) Descripción detallada de la metodología MTPM
- b) Elegir parámetros a evaluar
- c) Diseñar tabla de experimentos 2k
- d) Realizar pruebas experimentales en maquinado CNC
- e) Realizar pruebas en Rayos X para ver esfuerzos compresivos

4.1 Análisis de la Metodología para el mapa tecnológico de procesos de manufactura

El diagrama general de la metodología para el Mapa Tecnológico de Proceso de Manufactura (MTPM) se muestra en la Figura 4.1. Es una propuesta confiable para evaluación de las tecnologías de procesos de manufactura que está sustentada y desarrollada en base al manejo del riesgo y toma de decisiones en el proceso de desarrollo de tecnología, que recomienda Isabelle Andréasson y Gabriele Catalano (2014) en su trabajo “Variation Risk Management and Decision Making” (50). Debido a la naturaleza de los procesos de manufactura del sector automotriz, siendo del tipo estocásticos en gran medida, de alta variabilidad y exigencia en índice de capacidad de proceso (Cpk) que va de 1.33, para procesos existentes, hasta 1.66, en parámetros críticos o de seguridad para procesos nuevos como lo regula el sistema de calidad Six-Sigma. Se hace necesario el uso de una metodología como la propuesta, donde el MTPM, es una metodología que fusiona la técnicas de “VMEA + Stream Map+ Financials Evaluation” como apoyo al monitoreo de tecnologías y complejidad del manejo de activos productivos por cambios tecnológicos de las empresas.

La metodología MTPM se divide en 3 secciones principales:

- I. Análisis de Modo y Efecto de Variación de los procesos.
- II. Evaluación Factibilidad de Parámetros Impulsores de la Tecnología.
- III. Análisis de oportunidades para nuevas tecnologías.

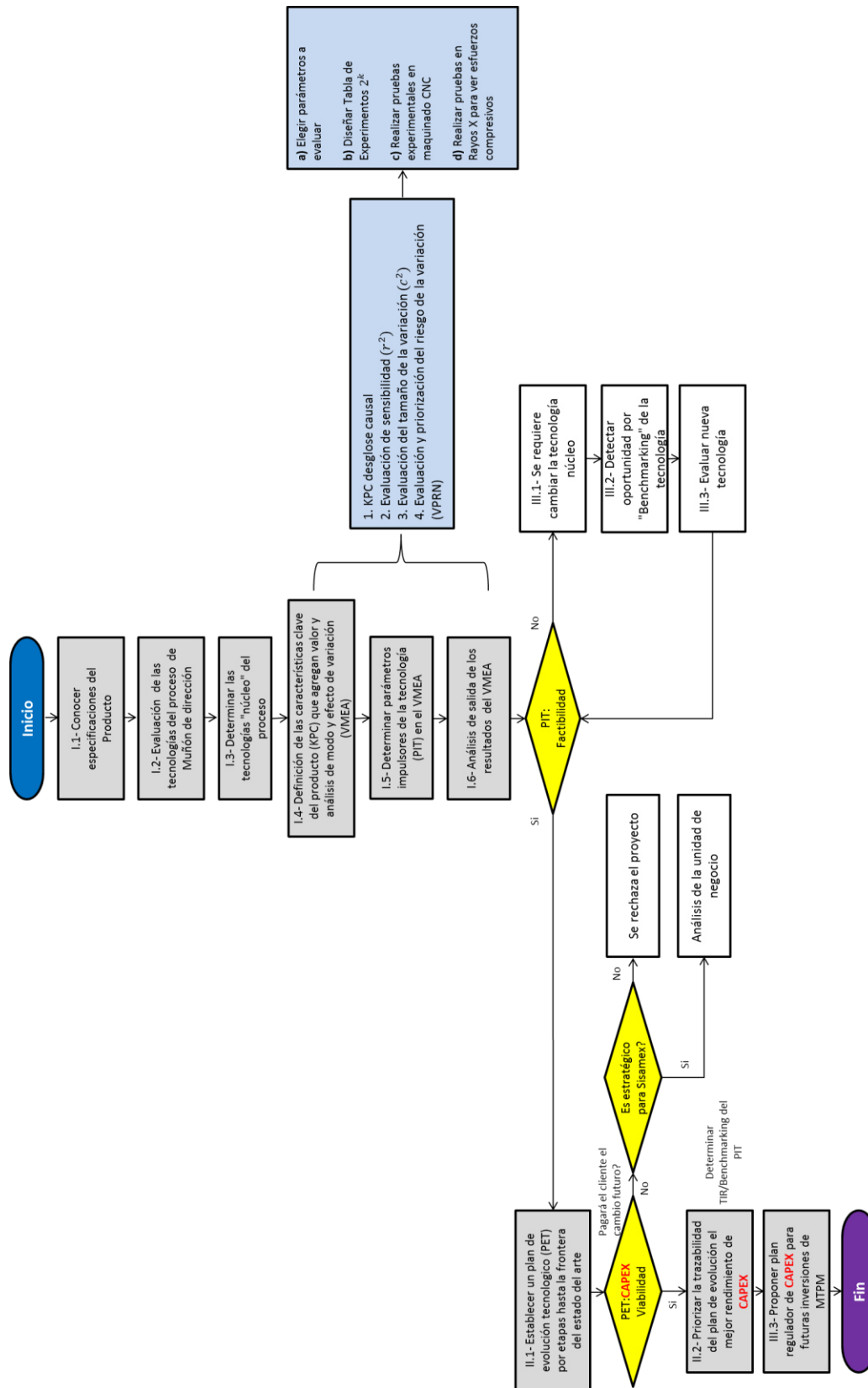


Figura 4. 1. Metodología para el Mapa Tecnológico de Proceso de Manufactura (MTPM)

4.1.1 Descripción del VMEA en los procesos.

En esta sección se analiza el producto o componente a evaluar en función de las especificaciones del producto y del proceso de manufactura; considerando las diferentes tecnologías de manufactura y determinando las tecnologías claves dentro de las etapas I.1 a I.3. Posteriormente se realiza un estudio completo usando la técnica de VMEA, dentro de las etapas I.4 a I.6. En esta sección se ubican los PIT y se priorizan en función de un análisis de riesgo variacional y el desglose de sus causales. Existe un bloque experimental donde se determina un diseño de experimentos para evaluación (DOE) y finalmente la ejecución de los mismos para analizar los datos de salida.

En particular existen algunos procesos de manufactura del sector automotriz, como Maquinados, Estampado, Soldadura y Tratamientos Térmicos entre otros, que pueden ser sujetos a este análisis en función del tipo de producto que se manufactura. Aunque el presente estudio se centró particularmente en el proceso de Maquinados de Muñones para vehículos pesados Clase 7 y 8, tomando como referencia un caso específico de la línea de maquinados de Diámetros de Balero Interior y Sello en Muñones de SISAMEX.

Existen varias maneras de evaluar tecnologías potenciales para un proceso de manufactura conocido, entre ellas están los ejercicios de benchmark o estudios de Análisis Situacional de la Tecnología conocidos como AST, los que oferta Frost & Sullivan (51). También es posible efectuar una revisión de Mapas Tecnológicos de los fabricantes de equipo original (OEM's) como un socio tecnológico en la incorporación de sus tendencias de evolución, y más profundo se recomienda un estudio de prospectiva tecnológica del estado del arte, donde se detectan a través de la actividad científica en publicaciones de revistas indexadas en JCR (Springer, Elsevier, etc.) investigadores que están en la frontera del conocimiento en temas específicos de la ciencia aplicada y pueden orientar las tendencias de las innovaciones tecnológicas para poder

establecer una ruta confiable, hacia dónde se moverá la tecnología para establecer una estrategia de Vigilancia Tecnológica.

El MPTM, en su primer parte Figura 4.2, consiste de 6 etapas para determinar los KPC's, partiendo de las especificaciones del producto, logrando determinar tecnologías núcleo e identificar los procesos que agregan valor a través del uso de técnicas como VSM que por sus siglas en inglés se conoce como "Value Stream Map", y evaluar así los procesos claves para determinar mediante el uso del análisis VMEA.

Una vez que se tiene identificado los procesos claves de las tecnologías núcleo, y se haya efectuado el análisis VMEA, que se describe más adelante por su rigurosidad científica, considerando que es un método de análisis de varianzas estadística de los parámetros críticos del proceso de manufactura, evalúa en orden de prioridad la relación de los factores del proceso que afectan la respuesta de salida y su relación de peso entre estos.

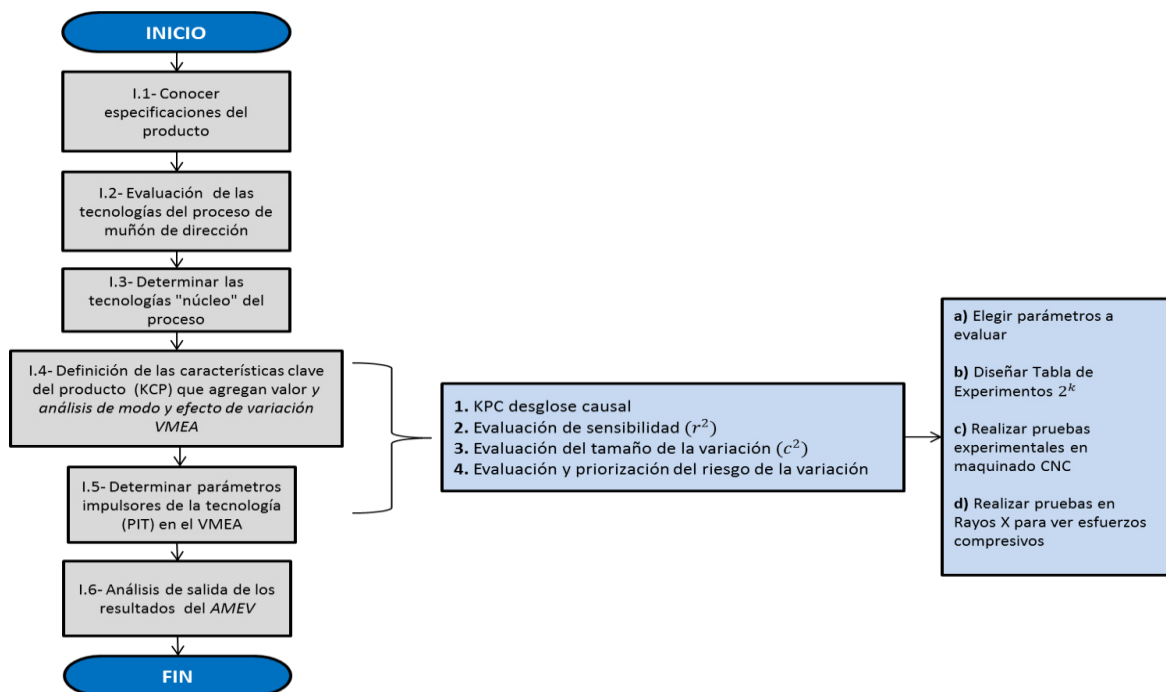


Figura 4. 2. Sección I: Análisis de Modo y Efecto de Variación (VMEA)

4.1.2 Evaluación Factibilidad de Parámetros Impulsores de la Tecnología

En esta sección se evalúa la factibilidad del cambio del PIT, considerando aún que no se encuentra en el límite o frontera de la tecnología núcleo, entonces se desarrolla un plan de evolución tecnológica (sección II.1 de la figura 4.3.), que estará determinado por un métrico de CAPEX (sección II.2 de la figura 4.3.) y se establece una priorización que direcciona un plan regulador del CAPEX (sección II.3 de la figura 4.3.) para futuras inversiones.

Es decir, es posible determinar una superficie de respuesta de los factores más importantes que tienen influencia en la optimización de la respuesta de un proceso, sea tiempo de maquinado, valor óptimo de los esfuerzos internos, maximizar piezas/min, etc. Cuantificando el peso de contribución de los factores, como VC, presión del herramental, propiedades del material, porcentaje de desgaste de la herramienta etc.

Encontrando así los PIT, tenemos por ejemplo: Si comparamos la velocidad de remoción de material de maquinado convencional, como VC, para un acero de fundición de mediana dureza, como se muestra en la Tabla 4.1., sabremos que está en el orden de 70-85 m/min (utilizando herramienta de carburo), porque depende de la temperatura de ablandamiento del material, si el material es aluminio la velocidad de maquinado se verá severamente incrementada hasta un máximo de 1000 m/mm con la misma herramienta, y si retiramos la limitante de la temperatura de ablandamiento o fusión del material, y cambiamos a una tecnología de no-contacto herramental-pieza de trabajo, vamos a mover el PIT de la VC por encima del valor límite del maquinado convencional, pero encontraremos que ahora la limitante será otro parámetro de proceso como nuevo objetivo.

Tabla 4. 1. Comparación de velocidad de remoción de material para maquinado (52)

| Material a Mecanizar | Herramienta de acero rápido m/min | Herramienta de carburo m/min |
|-----------------------------|--|-------------------------------------|
| Acero (resistente) | 15 - 18 | 60 - 70 |
| Acero dulce | 30 - 38 | 110 - 140 |
| Fundición (media) | 18 - 24 | 70 - 85 |
| Bronce | 24 - 45 | - |
| Latón | 45 - 60 | - |
| Aluminio | 75 - 400 | 150 - 1000 |
| Titanio | 30 | 60 - 70 |

Una vez, planteado el MTPM, y conocidas las rutas que son factibles técnicamente tomar, es preciso volver a plantear una segunda interrogante en la metodología del MTPM; ¿Presenta viabilidad el PET?, como se muestra en el diagrama de la Figura 4.3 Es decir, ¿estará dispuesto el mercado a pagar el cambio tecnológico, considerando la ventaja en el valor agregado al producto que el cliente en su especificación está solicitando, o es una ventaja del manejo de costos operativos? En el caso de beneficios de ahorros operativos, donde solo permite una ventaja de ahorro para la empresa, el equipo de operaciones en conjunto con el área de innovación deberá ser muy exigente para determinar la estrategia del cambio tecnológico, pues debe ser capaz de visualizar más allá de una sostenibilidad del índice de capacidad productiva por una ventaja competitiva.

Para lo cual un análisis financiero, también nos permite la evaluación del proyecto desde sus fases iniciales y lograr sustentar la toma de decisión a través de indicadores financieros tipo TIR / VPN / Payback (Tasa interna de Retorno / Valor Presente Neto / Retorno de pago en años), para poder tomar una decisión favorable y/o priorizar el PET (Plan de Evolución Tecnológico), de tal manera que exista una regulación de las decisiones del CAPEX en concepto y temporalidad para la empresa.

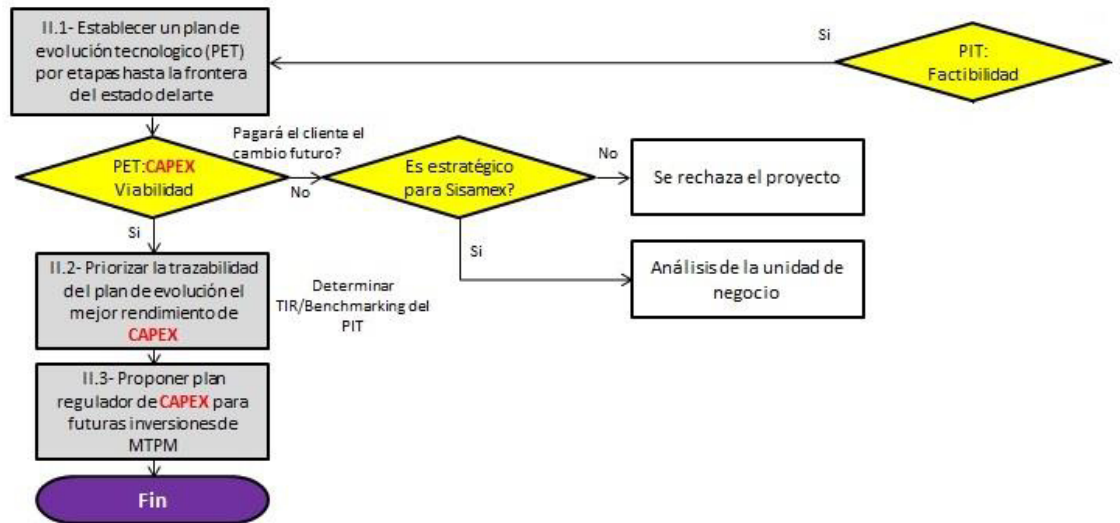


Figura 4. 3. Sección II: Evaluación Factibilidad de PIT

4.1.3 Análisis de oportunidades para nuevas tecnologías.

Es aquí, donde entran interrogantes claves: ¿Es factible mover el PIT?, y de no ser afirmativo como se indica en la Figura 4.4., entonces ¿Cómo se puede evaluar las tecnologías de reemplazo? Considerando dar respuesta la metodología MTPM propone realizar un estudio del estado del arte y evaluar tecnologías emergentes en sus fases embrionarias, que puedan entrar a un plan de desarrollo entre el centro de investigación proponente y la empresa tractora. El Plan de Evolución se debe diseñar por etapas hasta la frontera tecnológica, determinada por el mapeo tecnológico comercial y el estado del arte a través de un análisis de tendencias en patentes y/o publicaciones científicas alrededor del tema. Habrá que poner cuidado especial en la factible resultante de los nuevos PIT, ya que se está cambiando la tecnología núcleo, y habrá que detectar las tecnologías emergentes potenciales que puedan resolver el reto de mover el parámetro impulsor del proceso, recordemos que este parámetro es el que está agregando valor al producto y/o la especificación del cliente y permite tener una ventaja tecnológica con respecto a la competencia.

Lo anterior permite una serie de acciones para acercar la solución en la medida que el Plan de Evolución conecte con los tiempos del proceso de incorporación de la nueva tecnología, que puede ya no sea adquirida como un paquete tecnológico comercial, integrada en la máquina o en la cadena de suministro; que sea desarrollada por el equipo de ingeniería, a través de un programa de investigación y desarrollo tecnológico (R&D), involucrando aliados estratégicos, como lo pueden ser investigadores de IES (Instituciones de Educación Superior) y de CPI's (Centros Públicos de Investigación) nacionales y de talla internacional de ser necesario.

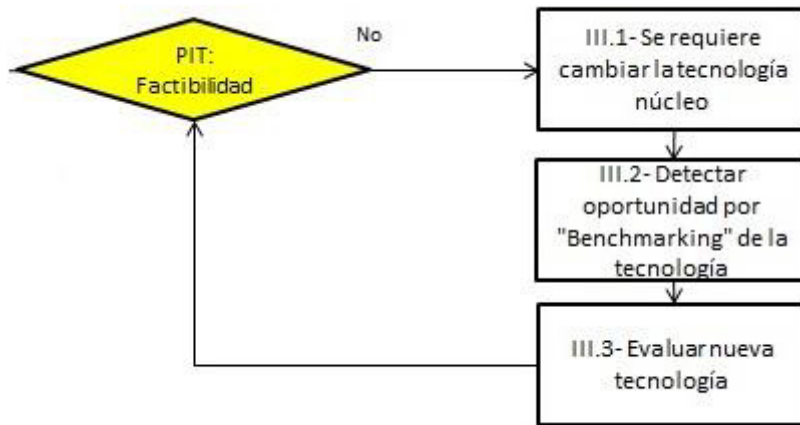


Figura 4. 4. Sección III: Análisis de oportunidades para nuevas tecnologías

4.2 Elegir parámetros a evaluar

Para este paso, se busca desarrollar un diagrama de Ishikawa específicamente para la operación de rolado de radios, mostrando la KPC y su desglose en Sub-KPC y NF, el cuál debe de realizarse en un grupo de trabajo para seleccionar con que KPC se trabajará, para el caso de este análisis se tomaron los Esfuerzos Internos Compresivos (EIC) como la KPC.

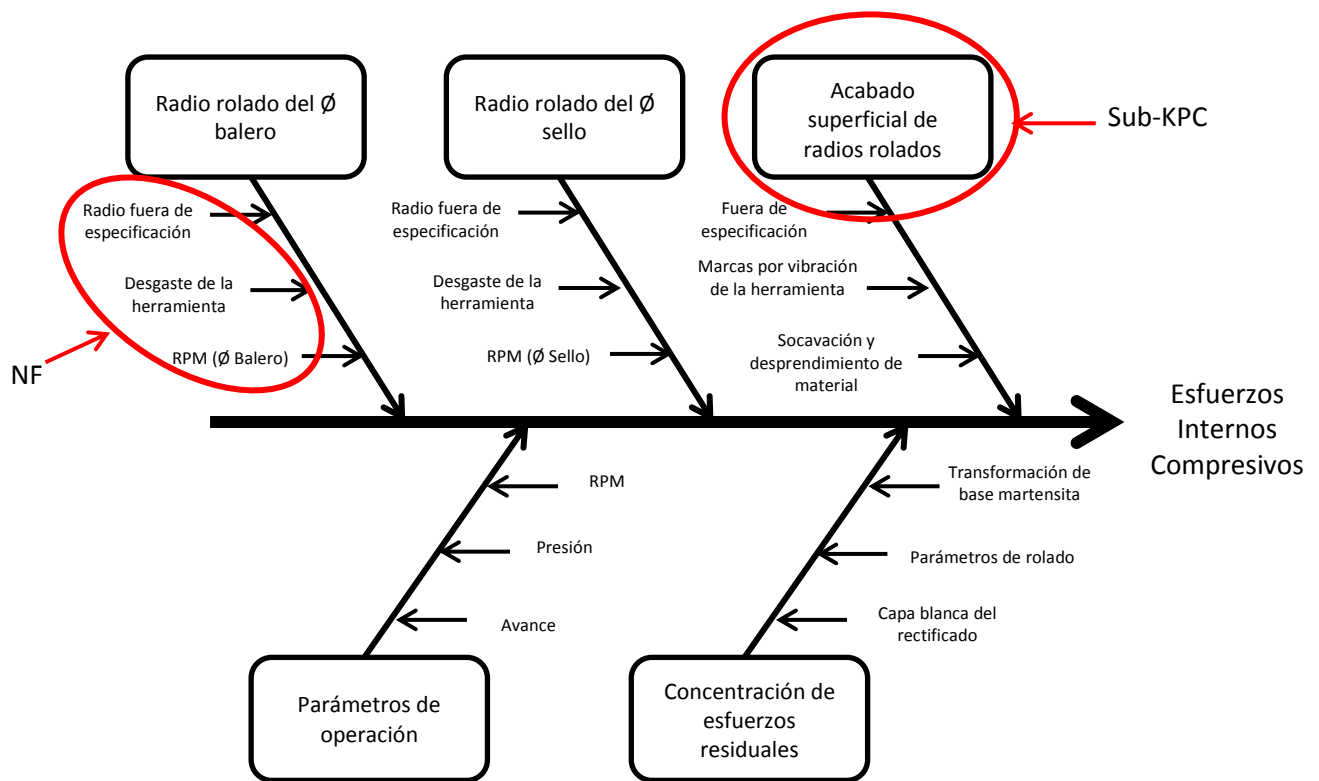


Figura 4. 5. Diagrama de Ishikawa para EIC

Como se muestra en la Figura 4.5, una vez que se determinó la KPC se busca desglosarla en Sub-KPC las cuáles pueden derivar del producto, las partes del producto o el proceso de manufactura (18) y, qué a su vez, se ven afectadas por uno o más NF's. Para el caso de esta investigación, se optó por tomar cinco sub-KPC's los cuales son: radio de rolado del Diámetro Balero Interior (DBI), radio rolado del Diámetro Sello (DS), acabado superficial de radios rolados, parámetros de operación y concentración de esfuerzos residuales; Donde cada sub-KPC cuentan con sus propios NF los cuáles afectan al KPC pasando por los Sub-KPC's los cuáles se muestran a continuación en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Factores de Ruido (NF)

| Factores de Ruido |
|---|
| - Presión |
| - Avance |
| - Desgaste de la herramienta |
| - Acabado fuera de especificación |
| - Marcas por vibración de la herramienta |
| - Socavación y desprendimiento del material |
| - Radio fuera de especificación |
| - RPM (Sello y Balero) |
| - Transformaciones de base martensita |
| - Parámetros de rolado |
| - Capa blanca del rectificado |

4.3 Diseñar tabla de experimentos 2k (DOE)

Una vez definidos los NF's para cada Sub-KPC's, se optó por tomar en base a la experiencia de los ingenieros, los NF's: Presión, Avance y Desgaste de Herramienta, ya que son los factores que más impactan a la operación para brindar un mejor desempeño en campo al componente, por lo que se generó un diseño de experimentos donde se tomó como muestra 8 piezas para pasarlas a pruebas experimentales con determinados parámetros establecidos por la actual operación; estos son:

Tabla 4. 3. Parámetros de operación “rolado de radios” para componente Muñón de Dirección

| Variable | Nombre de la variable | Unidad |
|-----------------|------------------------------|--------------------|
| X1: | Presión Hidráulica (A) | Lb/in ² |
| X2: | Velocidad de Avance (B) | in/RPM |
| X3: | Desgaste de Htta (C) | % |
| X4: | Velocidad angular RPM (D) | RPM |

Para el diseño de experimentos se utilizó la tabla 4.4 donde se muestran los parámetros del proceso de rolado como características clave del proceso determinadas. Se establece para cada una de estas variables dos niveles, mínimo y máximo valor de la variable para el análisis de respuesta, considerando tener la mejor sensibilidad posible del sistema. En algunos casos, el nivel máximo es determinado por el equipo o máquina de referencia para el desarrollo experimental. En el caso de una máquina CNC para Ecoroll, donde una herramienta es el dispositivo utilizado para generar el rolado sobre los radios del muñón, produciendo una serie de capas deformadas plásticamente e infiriendo magnitudes de esfuerzos residuales requeridos en la superficie de la pieza, siendo la intención para este producto, producir propiedades superficiales de alta resistencia por su condición de operación, que van debajo de -60 ksi a -130 ksi. Donde la presión hidráulica se utilizó al máximo y mínimo permitidos por la operación. Así como también de 0.5 a 1.5 de la velocidad de avance del cabezal en in/RPM, y para el caso de la herramienta, se utiliza una herramienta nueva (0% de desgaste), y una herramienta desgastada (aprox. 3.5% de desgaste) obtenida de las últimas piezas en producir, antes de terminar su ciclo útil.

Para el caso de la velocidad angular, se sabe que una pieza sujeta en el punto y contrapunto de un torno de control numérico presenta una velocidad angular variable en función del diámetro de la pista del punto externo de la pieza. En este caso, cuando el Muñón de Dirección está montado en el torno CNC (Ecoroll), el diámetro del Sello presenta una velocidad de 200 RPM

mientras que el diámetro de balero se encuentra en 300 RPM. Por lo que podríamos considerar este factor constante para cada condición reduciendo la tabla de experimentos 4.5 a sus respectivas tablas experimentales 4.6 para diámetro de Sello (DS) y 4.7 para diámetro de Balero Interior (DBI).

Tabla 4. 4. Parámetros para desarrollar la tabla de experimentos

| Variable | Nombre de la variable | Unidad | (-) | (+) |
|-----------------|------------------------------|--------------------|------------|------------|
| X1: | Presión Hidráulica | Lb/in ² | 200 | 560 |
| X2: | Velocidad de Avance | in/RPM | 0.001 | 0.003 |
| X3: | Desgaste de Htta. | % | 0 | 3.125 |
| X4: | Velocidad angular | RPM | 200 | 300 |

Tabla 4. 5. Matriz de experimentos 2⁴ factorial completo para k=4

| EXP. | X1 | X2 | X3 | X4 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | - | - | - | - |
| 2 | + | - | - | - |
| 3 | - | + | - | - |
| 4 | + | + | - | - |
| 5 | - | - | + | - |
| 6 | + | - | + | - |
| 7 | - | + | + | - |
| 8 | + | + | + | - |
| 9 | - | - | - | + |
| 10 | + | - | - | + |
| 11 | - | + | - | + |
| 12 | + | + | - | + |
| 13 | - | - | + | + |
| 14 | + | - | + | + |
| 15 | - | + | + | + |
| 16 | + | + | + | + |

Entonces como resultado final, para la tabla de diseño de experimentos 4.5 para el proceso de rolado de radios del Sello y Balero Interior, resulta en 8 experimentos para cada condición, considerando un DOE de 2^{4-1} , representando un factorial fraccionado k-1, es decir 3 factores. Siendo el factor X4 constante como se muestra en la Tabla 4.6 y Tabla 4.7.

Tabla 4. 6. Parámetros para pruebas experimentales en Diámetro de Sello (DS)

| EXP. | X1 (lb) | X2 (in/RPM) | X3 (% desgaste) | X4 (RPM) |
|-------------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 560 | 0.001 | 3.125 | 200 |
| 2 | 560 | 0.003 | 3.125 | 200 |
| 3 | 200 | 0.001 | 3.125 | 200 |
| 4 | 200 | 0.003 | 3.125 | 200 |
| 5 | 560 | 0.001 | 0 | 200 |
| 6 | 560 | 0.003 | 0 | 200 |
| 7 | 200 | 0.001 | 0 | 200 |
| 8 | 200 | 0.003 | 0 | 200 |

Tabla 4. 7. Parámetros para pruebas experimentales en Diámetro Balero Interior (DBI)

| EXP. | X1 (lb) | X2 (in/RPM) | X3 (% desgaste) | X4 (RPM) |
|-------------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| 1 | 560 | 0.001 | 3.125 | 300 |
| 2 | 560 | 0.003 | 3.125 | 300 |
| 3 | 200 | 0.001 | 3.125 | 300 |
| 4 | 200 | 0.003 | 3.125 | 300 |
| 5 | 560 | 0.001 | 0 | 300 |
| 6 | 560 | 0.003 | 0 | 300 |
| 7 | 200 | 0.001 | 0 | 300 |
| 8 | 200 | 0.003 | 0 | 300 |

4.4 Desarrollo de experimentos – caso de estudio rolado de radios para muñón de dirección

El proceso de rolado, conocido como Ecoroll, genera esfuerzos residuales de compresión a lo largo de las capas superficiales, aunque también existen tensiones residuales de tracción en las superficies mecanizadas. Buscando con esto mejorar el desempeño mecánico de la pieza para aumentar los ciclos de trabajo de manera sustancial, pasando de 200,000 ciclos hasta los 800,000 ciclos antes de falla. Los parámetros de proceso del rolado generalmente incluyen 1) velocidad de rolado, 2) tasa de avance de rolado, 3) presión de fluido aplicada o normal a la fuerza y 4) diámetro de la bola (rodillo). Este estudio se realizó en 8 muestras de Muñones de Dirección en un material de acero colado (equivalente a AISI 4XX). Estas muestras fueron marcadas posteriores al proceso de rectificado del Muñón de Dirección, para ser roladas por primera vez. Se utiliza una herramienta dura y se mide el desgaste de flanco, usando diferentes condiciones de rolado. La Figura 4.6 indica la posición de los diámetros de rolado en el muñón para el diámetro de Sello y diámetro de Balero Interior.



Figura 4. 6. Componente Muñón de Dirección señalando los diámetros Sello y diámetro de Balero Interior

4.4.1 Selección de piezas para maquinado para pruebas experimentales

Una vez que ya se cuenta con los parámetros para las pruebas experimentales con los que se trabajarán, se siguió el diseño de experimentos de la Tabla 4.6 y Tabla 4.7, se programó el día para el maquinado de piezas en conjunto con los ingenieros de producción y manufactura para contar con su apoyo en las actividades de recolección de piezas y ajuste de parámetros en CNC, respectivamente.

1. El primer paso fue recolectar las 8 piezas para posteriormente maquinaslas; para este estudio no se requirió precisamente que las piezas fueran obtenidas directamente de producción incluso se tomaron algunas piezas siempre y cuando esas piezas ya hubieran pasado por la operación de rectificado, que es una anterior a la de rolado de radios, y hayan cumplido las especificaciones del rectificado en ambos diámetros (\varnothing Balero interior 2.624" y \varnothing Sello 3.5").



Figura 4. 7. Calibradores Go - No Go para medir los diámetros balero interior y sello en operación de rectificado

2. Para el segundo paso se hicieron ajustes en el CNC con ayuda de los ingenieros de acuerdo a los parámetros anteriormente mencionados para la presión, avance y diámetro de herramienta.



Figura 4. 8. Ajuste del indicador de presión en milímetros para una fuerza de rolado en libras



Figura 4. 9. Herramientas de rodillo para operación de rolado de radios

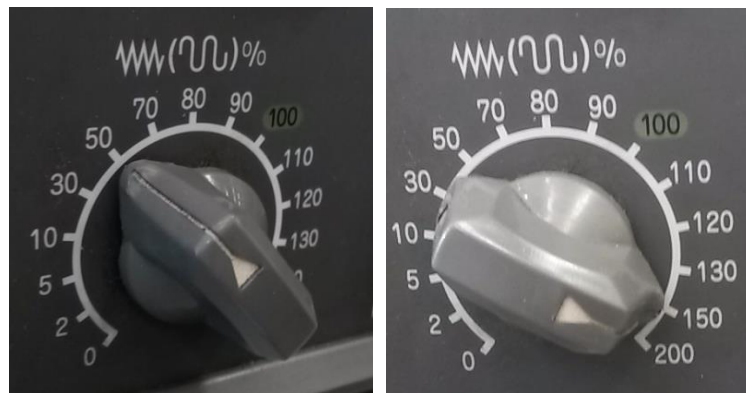


Figura 4. 10. Ajuste de velocidad de avance en la operación a un 50% y 150%

Para las primeras 4 piezas que se maquinaron, se utilizó una herramienta desgastada (dentro de las últimas 100 piezas de su ciclo de vida) y

se utilizaron los siguientes parámetros tanto para el diámetro balero interior como sello:

Tabla 4. 8. Corridas experimentales para las primeras 4 piezas a maquinar

| Muestras | X1 (lb) | X2 (in/RPM) | X3 (% desgaste) | X4 (RPM) |
|-----------------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| M1-DS | 560 | 0.001 | 3.125 | 200 |
| M2-DS | 560 | 0.003 | 3.125 | 200 |
| M3-DS | 200 | 0.001 | 3.125 | 200 |
| M4-DS | 200 | 0.003 | 3.125 | 200 |
| M1-DBI | 560 | 0.001 | 3.125 | 300 |
| M2-DBI | 560 | 0.003 | 3.125 | 300 |
| M3-DBI | 200 | 0.001 | 3.125 | 300 |
| M4-DBI | 200 | 0.003 | 3.125 | 300 |

En el caso de las cuatro piezas restantes se manejaron los siguientes parámetros con una herramienta totalmente nueva:

Tabla 4. 9. Corridas experimentales para las últimas 4 piezas a maquinar

| Muestras | X1 (lb) | X2 (in/RPM) | X3 (% desgaste) | X4 (RPM) |
|-----------------|----------------|--------------------|------------------------|-----------------|
| M1-DS | 560 | 0.001 | 0 | 200 |
| M2-DS | 560 | 0.003 | 0 | 200 |
| M3-DS | 200 | 0.001 | 0 | 200 |
| M4-DS | 200 | 0.003 | 0 | 200 |
| M1-DBI | 560 | 0.001 | 0 | 300 |
| M2-DBI | 560 | 0.003 | 0 | 300 |
| M3-DBI | 200 | 0.001 | 0 | 300 |
| M4-DBI | 200 | 0.003 | 0 | 300 |

- Una vez finalizado el proceso de maquinado de las ocho piezas, se mandaron a la sierra cinta para reducir sus dimensiones debido a las limitaciones del equipo de rayos X.



Figura 4. 11. a) Cortadora y b) componentes seccionados

Cabe mencionar que las piezas aun estando seccionadas, no se vieron afectados sus esfuerzos compresivos generados por la operación de rolado de radios debido a que ya se contaba anteriormente con especificaciones para el

corte de la pieza por parte de Calidad para cuidar que no hubiera ninguna distorsión en los esfuerzos compresivos y así proceder al estudio de rayos X sin problema.

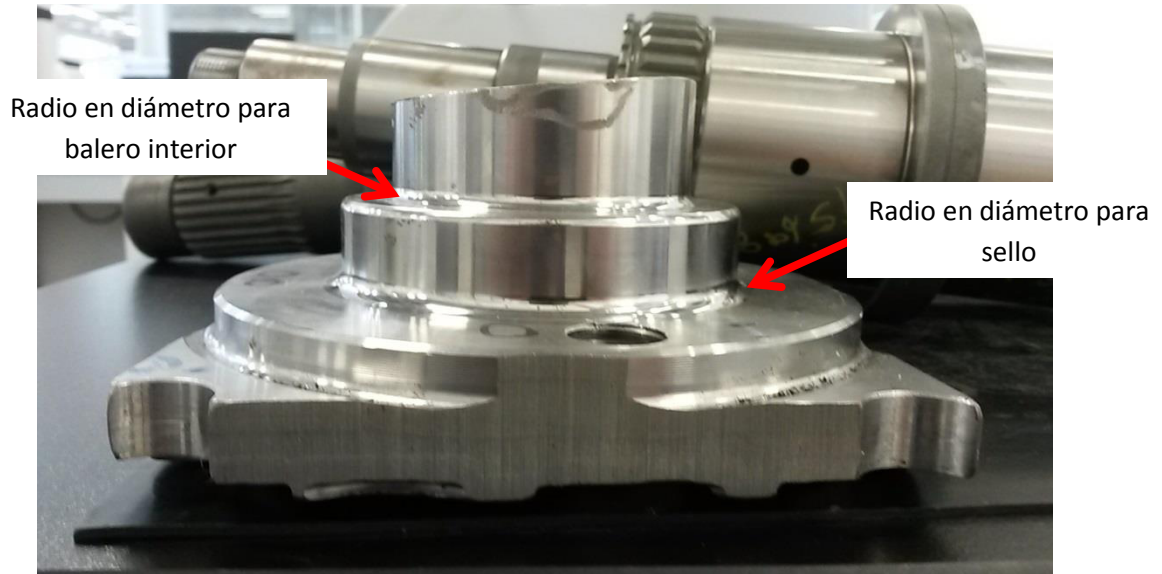


Figura 4. 12. Muñón de Dirección seccionado mostrando los radios de balero interior y sello

4.5 Rayos X para determinar esfuerzos compresivos

Una vez concluido el paso del maquinado de las piezas con el ajuste de parámetros necesarios, y el seccionado de cada una de ellas, pasamos a las pruebas en Rayos X para determinar los esfuerzos compresivos. Para ello deben de cumplir ciertos requisitos para posteriormente realizar los estudios:

- Mandar piezas a la sierra cinta para reducir dimensiones
- La superficie rolada debe ser lisa y estar pulida en cada punto tangente.
- Los remanentes del acabado original de la superficie mecanizada no se deben ver con un aumento de potencia baja (30x).

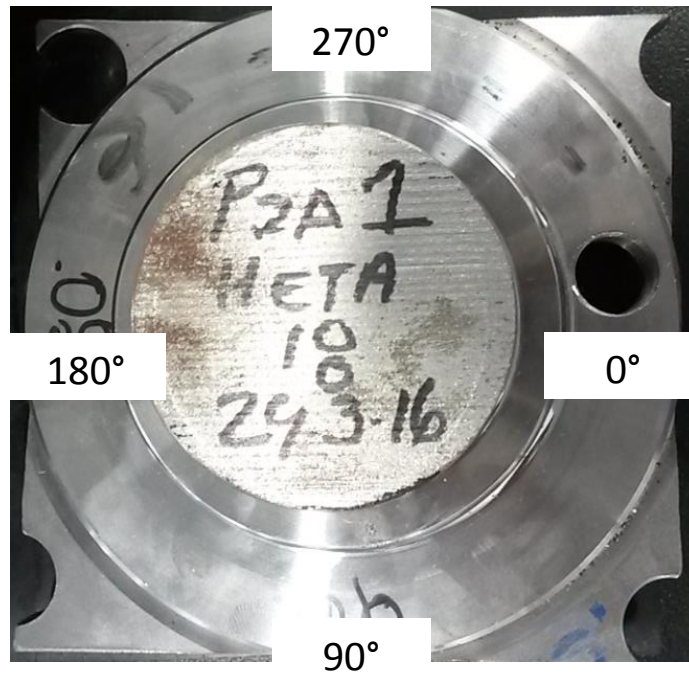


Figura 4. 13. Muñón de Dirección seccionado preparado para estudio de rayos X

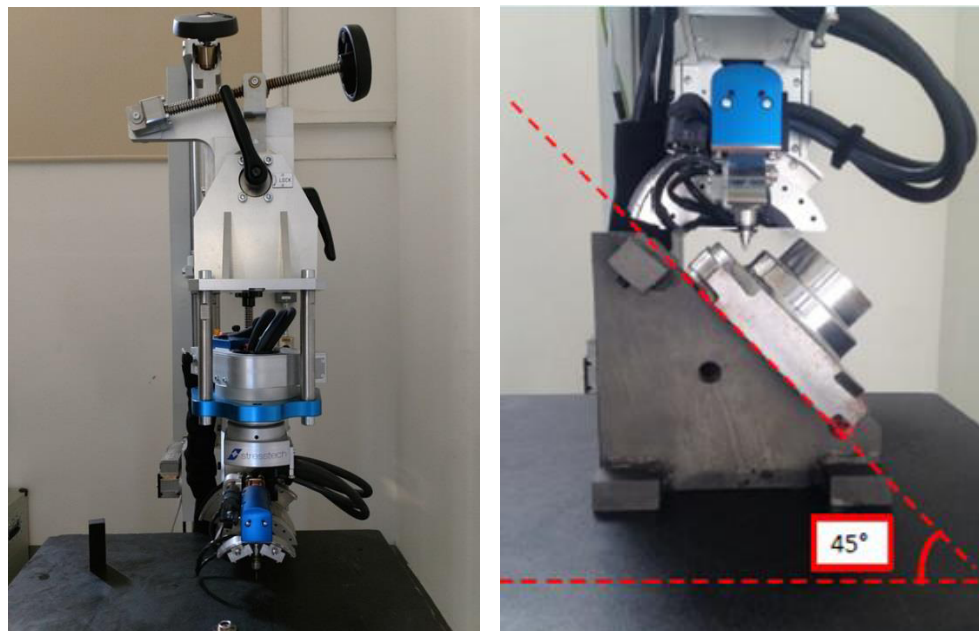


Figura 4. 14. a) Equipo de rayos X para estudio de esfuerzos compresivos b) ángulo de posicionamiento de pieza a evaluar

El equipo que se utilizó para la medición de estas piezas fue un difractómetro de Rayos-X (Figura 4.14) y las piezas fueron evaluadas por equipo entrenado de SISAMEX para la examinación visual de cada radio con un aumento de 30X.

A continuación, en la Tabla 4.10 y Tabla 4.11, se muestran los resultados obtenidos en el estudio de rayos x para la obtención de esfuerzos compresivos en cada uno de los puntos (ángulos) donde se midió en las 8 piezas que se tomaron como pruebas experimentales.

A su vez es importante aclarar que la especificación dada por el cliente que se debe respetar para los esfuerzos compresivos óptimos es de -60 KSI a -130 KSI.

Tabla 4. 10. Esfuerzos Compresivos para el Radio de Diámetro de Sello (kSi)

| Pieza n° | Radio de diámetro de Sello | | | |
|----------|----------------------------|--------|--------|--------|
| | 0° | 90° | 180° | 270° |
| 1 | -117.9 | -113.5 | -110 | -123.2 |
| 2 | -121.9 | -116.1 | -121.1 | -120.6 |
| 3 | -81 | -94.1 | -98.5 | -97 |
| 4 | -68.8 | -82.8 | -83.2 | -56.01 |
| 5 | -118.6 | -114.6 | -107.4 | -113.8 |
| 6 | -112.9 | -120.7 | -112.5 | -127 |
| 7 | -75.6 | -80.62 | -76.3 | -75.05 |
| 8 | -88.2 | -90.1 | -95.4 | -85 |

Tabla 4. 11. Esfuerzos Compresivos para el Radio de Diámetro de Balero Interior (kSi)

| Pieza n° | Radio de diámetro de Balero Interior | | | |
|----------|--------------------------------------|--------|--------|---------|
| | 0° | 90° | 180° | 270° |
| 1 | -112.5 | -113.8 | -107.6 | -113 |
| 2 | -90 | -103 | -103 | -87.6 |
| 3 | -63.4 | -63.4 | -65.25 | -43.21 |
| 4 | -28.5 | -31.96 | -22.66 | -15 |
| 5 | -107.4 | -104.8 | -101.7 | -104.9 |
| 6 | -93.2 | -93.2 | -94.26 | -105.07 |
| 7 | -19.8 | -45.6 | -39.8 | -15.5 |
| 8 | -37.2 | -55.8 | -49.07 | -44.8 |

Como se puede observar en la Tabla 4.10 hubo fuera de especificación una pieza mientras que en la Tabla 4.11 se puede observar que hubo fuera de especificación 4 piezas en ciertos ángulos que se midieron, debido a los ajustes de parámetros que se manejaron y que más adelante, en el próximo capítulo, se explicarán los resultados obtenidos en base a lo mostrado.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis de los resultados para el caso de estudio rolado de radios para muñón de dirección

De acuerdo a los resultados obtenidos en la medición de los esfuerzos residuales compresivos correspondiente al diseño de experimentos desarrollado en el capítulo 4 para el componente muñón de dirección, esto se muestra en la tabla 5.1 para el caso de Diámetro Sello y la tabla 5.2 para el Diámetro del Balero Interior. Las tablas muestran 4 magnitudes de esfuerzos internos compresivos en la superficie del material para 4 ángulos de medición que van de 0°, 90°, 180° y 270°. Estas mediciones son promediadas de manera aritmética y se determina la desviación estándar para cada conjunto que corresponde al experimento efectuado. El análisis estadístico de la media y desviación de los esfuerzos compresivos se aplicó para el conjunto de resultados del diámetro de balero y de igual manera para el diámetro de sello.

En el caso de los esfuerzos compresivos obtenidos para el diámetro de sello, como se muestra en la tabla 5.1, fue determinada una media de esfuerzos compresivos de -99.987 kSI con una desviación de la muestra experimental de 19.31. Mientras que los esfuerzos compresivos obtenidos para el diámetro de

balero interior, mostrados en la tabla 5.2, fue determinada en una media de -71.124 kSI con una desviación de la muestra experimental de 34.15.

Tabla 5. 1. Resultados obtenidos de la medición de los esfuerzos residuales compresivos del diseño de experimentos para diámetro de Sello

| Exp. | Diseño de experimentos | | | | (Ysθ) PARAMETROS DE RESPUESTAS (D. Sello) | | | | | |
|------|------------------------|---------------------|----------------------|------------------|--|--------|--------|--------|------------|--------|
| | (A) Presión (lbr/in2) | (B) Avance (ln/RPM) | (C) Desgaste HTA (%) | (D) W Rate (RPM) | 0° | 90° | 180° | 270° | Promedio | Desv. |
| 1 | X(1,1)=560 | X(2,1)=0.001 | X(3,1)=-3.125 | X(4,1)=200 | -117.9 | -113.5 | -110 | -123.2 | -116.15 | 5.70 |
| 2 | X(1,2)=560 | X(2,2)=0.003 | X(3,2)=-3.125 | X(4,2)=200 | -121.9 | -116.1 | -121.1 | -120.6 | -119.93 | 2.61 |
| 3 | X(1,3)=200 | X(2,3)=0.001 | X(3,3)=-3.125 | X(4,3)=200 | -81 | -94.1 | -98.5 | -97 | -92.65 | 7.98 |
| 4 | X(1,4)=200 | X(2,4)=0.003 | X(3,4)=-3.125 | X(4,4)=200 | -68.8 | -82.8 | -83.2 | -56.01 | -72.70 | 12.99 |
| 5 | X(1,5)=560 | X(2,5)=0.001 | X(3,5)=0 | X(4,5)=200 | -118.6 | -114.6 | -107.4 | -113.8 | -113.60 | 4.64 |
| 6 | X(1,6)=560 | X(2,6)=0.003 | X(3,6)=0 | X(4,6)=200 | -112.9 | -120.7 | -112.5 | -127 | -118.28 | 6.93 |
| 7 | X(1,7)=200 | X(2,7)=0.001 | X(3,7)=0 | X(4,7)=200 | -75.6 | -80.62 | -76.3 | -75.05 | -76.89 | 2.54 |
| 8 | X(1,8)=200 | X(2,8)=0.003 | X(3,8)=0 | X(4,8)=200 | -88.2 | -90.1 | -95.4 | -85 | -89.68 | 4.36 |
| | | | | | | | | | μSello= | -99.98 |
| | | | | | | | | | S= | 19.32 |
| | | | | | | | | | Var Samp 1 | 373.10 |

KSI

Tabla 5. 2. Resultados obtenidos de la medición de los esfuerzos residuales compresivos del diseño de experimentos para diámetro de Balero Interior

| Exp. | Diseño de experimentos | | | | (Ybθ) PARAMETROS DE RESPUESTAS (D. Balero Interior) | | | | | |
|------|------------------------|---------------------|-----------------------|------------------|--|--------|--------|---------|------------|---------|
| | (A) Presión (lbr/in2) | (B) Avance (ln/RPM) | (C) Diámetro HTA (in) | (D) W Rate (RPM) | 0° | 90° | 180° | 270° | Promedio | Desv. |
| 1 | X(1,1)=560 | X(2,1)=0.001 | X(3,1)=-3.125 | X(4,1)=300 | -112.5 | -113.8 | -107.6 | -113 | -111.73 | 2.80 |
| 2 | X(1,2)=560 | X(2,2)=0.003 | X(3,2)=-3.125 | X(4,1)=300 | -90 | -103 | -103 | -87.6 | -95.90 | 8.26 |
| 3 | X(1,3)=200 | X(2,3)=0.001 | X(3,3)=-3.125 | X(4,1)=300 | -63.4 | -63.4 | -65.25 | -43.21 | -58.82 | 10.44 |
| 4 | X(1,4)=200 | X(2,4)=0.003 | X(3,4)=-3.125 | X(4,1)=300 | -28.5 | -31.96 | -22.66 | -15 | -24.53 | 7.42 |
| 5 | X(1,5)=560 | X(2,5)=0.001 | X(3,5)=0 | X(4,1)=300 | -107.4 | -104.8 | -101.7 | -104.9 | -104.70 | 2.33 |
| 6 | X(1,6)=560 | X(2,6)=0.003 | X(3,6)=0 | X(4,1)=300 | -93.2 | -93.2 | -94.26 | -105.07 | -96.43 | 5.78 |
| 7 | X(1,7)=200 | X(2,7)=0.001 | X(3,7)=0 | X(4,1)=300 | -19.8 | -45.6 | -39.8 | -15.5 | -30.18 | 14.76 |
| 8 | X(1,8)=200 | X(2,8)=0.003 | X(3,8)=0 | X(4,1)=300 | -37.2 | -55.8 | -49.07 | -44.8 | -46.72 | 7.79 |
| | | | | | | | | | μBalero= | -71.12 |
| | | | | | | | | | S= | 34.16 |
| | | | | | | | | | Var Samp 2 | 1166.88 |

KSI

Se puede observar en la Figura 5.1 que al comparar los resultados de esfuerzos compresivos en los diferentes ángulos de medición sobre la superficie para el diámetro de sello y el diámetro de balero interior existe un comportamiento fuera de los límites establecidos por la especificación funcional del componente (muñón de dirección), que van de -60 kSI a -130 kSI. Siendo el conjunto de experimentos del diámetro de balero interior en las muestras 3, 4, 7 y 8 las que se encuentran por encima de -60 kSI hasta valores de -15 kSI. Solo el experimento 4 para el caso del diámetro de sello presenta un valor de esfuerzos compresivos ligeramente por encima de la especificación en -56 kSI,

que podría ser una desviación natural del entorno del experimento. No siendo así el caso del conjunto de experimentos del diámetro del balero interior.

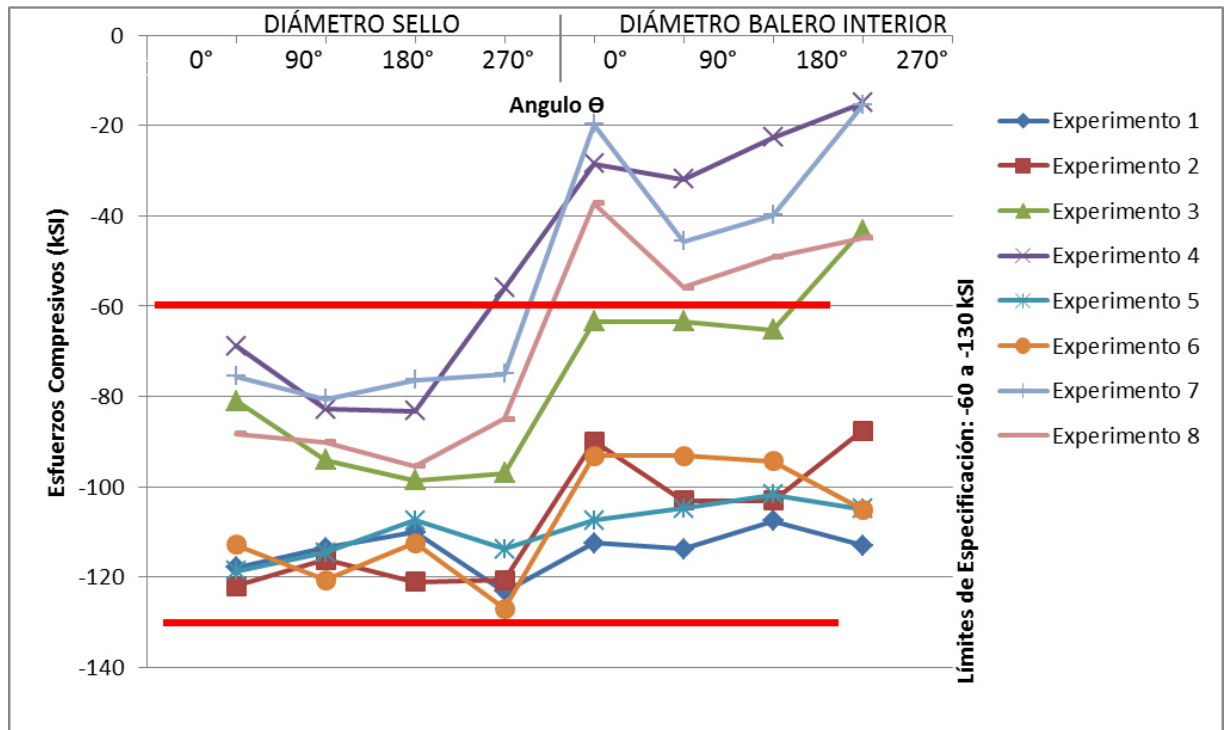


Figura 5. 1. Relación de esfuerzos compresivos para los diferentes ángulos de medición.
a) Diámetro de sello y b) diámetro de balero interior

La razón por la cual de los esfuerzos compresivos del balero interior se salen de especificación es debido a la baja presión de trabajo referido a la variable (A) de 200 lbf/in^2 , que fue aplicado a las muestras de los experimentos 3, 4, 7 y 8 y de igual manera para la tabla de resultados del diámetro de sello en el experimento 4, que presenta bajo valor de esfuerzos compresivos se realizó en una presión de carga de 200 lbf/in^2 .

Lo cual determina que la presión de carga de la herramienta de trabajo, rodillo de carga, es determinante en la magnitud de esfuerzos compresivos que se puedan generar en la muestra. Aunque existen resultados experimentales

con presión de trabajo de 200 lb/in que se obtuvieron resultados de esfuerzos compresivos dentro de la especificación se atribuye a una compensación en la relación de variables del sistema de rolado que permita un efecto global positivo.

La tabla 5.3 muestra los valores de covarianza poblacional del análisis estadístico de los 16 experimentos para la magnitud de los esfuerzos compresivos que resultó en cada condición de prueba. Los resultados de la media poblacional fueron de -85.554 kSI con una desviación de 30.89.

Tabla 5. 3. Análisis de varianza y covarianza poblacional para los experimentos de las muestras de las tablas 5.1 y 5.2

| | |
|-----------------|----------|
| COV Pob | 661.3016 |
| Var POB | 910.8202 |
| σ | 30.8892 |
| μ Pob (kSI) | -85.5540 |

5.2 Análisis de Factores para modelar la respuesta usando ANOVA.

El análisis de los resultados obtenidos en el diseño de experimentos (DOE) para las condiciones experimentales de rolado para diámetro de sello en tabla 5.1 y diámetro de balero interior en tabla 5.2, se realiza a través de una metodología conocida como análisis de varianza multifactores (ANOVA: Analysis of Variance). Siendo ANOVA una de las metodologías más rigurosas que existen para el análisis de variables discretas y continuas, cuando se utilizan modelos estocásticos y determinísticos. En el caso de estudio se considera que existen variables dependientes del entorno experimental y en

condiciones de variables combinadas se hace complicado analizar por separado por lo que la respuesta es probabilísticamente indeterminada, de tal forma que es necesario evaluar las variaciones de la respuesta en función de las condiciones de las variables. De esta manera es posible encontrar un modelo empírico que pueda aproximar la solución del experimento en un polinomio de orden mayor que contenga la condición de respuesta con la menor variación posible. Solamente con un método de análisis de superficie de respuesta conocida (RSM), es posible encontrar la condición óptima o deseable de la respuesta, determinando los valores más aceptables de las variables de estudio.

A continuación se describen ambas metodologías de manera breve considerando la discusión de los resultados obtenidos usando ambas técnicas, ANOVA y RSM:

i) Análisis ANOVA usando Design-Expert Software.

Design-Expert v10.0 es un paquete de software estadístico de Stat-Ease Inc. específicamente dedicado a realizar diseño de experimentos (DOE). Design-Expert ofrece pruebas comparativas, selección, caracterización, optimización, diseño de parámetros robustos, diseños de mezclas y diseños combinados (53). Design-Expert proporciona matrices de prueba para seleccionar hasta 50 factores. La significancia estadística de estos factores se establece con el análisis de varianza (ANOVA). Las herramientas gráficas ayudan a identificar el impacto de cada factor en los resultados deseados y revelan anomalías en los datos.

ii) Análisis de la metodología RSM utilizando Design-Expert Software

La metodología de superficie de respuesta (RSM) explora las relaciones entre varias variables explicativas y una o más variables de respuesta. El método fue presentado por George E. P. Box y K. B. Wilson en 1951 (54). La

idea principal de RSM es utilizar una secuencia de experimentos diseñados para obtener una respuesta óptima. Box y Wilson sugieren usar un modelo de polinomio de segundo grado para hacer esto. Reconocen que este modelo es solo una aproximación, pero lo usan porque es fácil de estimar y aplicar, incluso cuando se sabe poco sobre el proceso.

Existen aplicaciones de procesos químicos que utilizan un diseño estándar de RSM llamado diseño compuesto central (CCD, como se muestra en la Figura 5.2.) Es muy adecuado para instalar una superficie cuadrática, que generalmente funciona bien para la optimización del proceso.

El diseño de tres factores para este CCD se muestra a continuación. Está compuesto por un núcleo factorial que forma un cubo con lados que son dos unidades codificadas de longitud (de -1 a +1 como se indica en la tabla 4.5 Matriz de experimentos 24 factorial completo para $k=4$). Las estrellas representan puntos axiales.

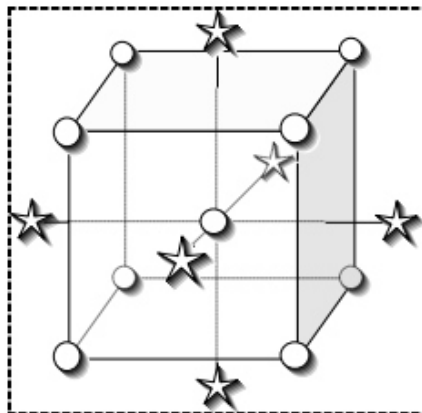


Figura 5. 2. Modelo de respuesta de diseño compuesto central (CCD) (55)

5.3 Evaluación del polinomio de segundo orden (modelo de respuesta).

La obtención del valor de respuesta de esfuerzos compresivos “Y”, para las condiciones de nivel mínimo (0) y máximo (1), obtenidos a través de la

ecuación polinomial de segundo orden para los factores se muestra en la tabla 5.4 para el rolado de diámetro de sello “ $Y_s\Theta$ ” y en la tabla 5.5 para el rolado del diámetro de balero interior “ $Y_b\Theta$ ”.

Los factores de estudio A, B, C, y sus combinaciones AB, BC, AC, ABC, son referidas a las variables o factores de analices definidas como Presión (A), Avance (B), Desgaste Herramienta (C), respectivamente. Así mismo las relaciones de combinación entre ellas.

La tabla 5.4 muestra los valores de los coeficientes del polinomio de segundo orden para la condición de nivel mínimo como valor de entrada, obteniendo el valor de respuesta de esfuerzos compresivos del modelo $Y\Theta = -99.9831$ kSI, comparando el valor real de los esfuerzos compresivos para la misma respuesta (diseño de experimento) en un $Y_s\Theta = -99.9727$; es decir un error entre el modelo estadístico del polinomio de segundo orden contra el experimento real de 0.01 %.

Mientras que la tabla 5.5 muestra los valores de los coeficientes del polinomio de segundo orden para la condición de nivel máximo como valor de entrada, obteniendo el valor de respuesta de esfuerzos compresivos del modelo $Y_s\Theta = -118.275$ kSI, comparando el valor real de los esfuerzos compresivos para la misma respuesta (diseño de experimento) en un $Y_s\Theta = -118.275$; es decir un error entre el modelo estadístico del polinomio de segundo orden contra el experimento real con una aproximación exacta.

Tabla 5. 4. Obtención del valor de respuesta de esfuerzos compresivos $Y_{s\theta}$ para valor de nivel mínimo

Ecuación Final en Términos de los Actuales Factores:

DIAMETRO SELLO

Coded Factors

| $Y_{s\theta}$ | = | -99.983125 | $Y1s$ | = | -99.97279231 |
|---------------|-------|-------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| -99.983125 | | Valor Nivel | -47.85027778 | | Valor Real |
| -17.004375 | * A | 0 | -0.113236111 | * Presión | 380 |
| -0.160625 | * B | 0 | -8645.277778 | * Avance | 0.002 |
| 0.373125 | * C | 0 | 14.86444444 | * Desg. HTA | -1.58 |
| -1.951875 | * AB | 0 | 11.26388889 | * Presión * Avance | 0.76 |
| 0.676875 | * AC | 0 | -0.024895299 | * Presión * Desg. HTA | -600.4 |
| -4.204375 | * BC | 0 | -7757.094017 | * Avance * Desg. HTA | -0.00316 |
| 3.979375 | * ABC | 0 | 13.60470085 | * Presión * Avance * Desg. HTA | -1.2008 |

Tabla 5. 5. Obtención del valor de respuesta de esfuerzos compresivos $Y_{s\theta}$ para valor de nivel máximo

Ecuación Final en Términos de los Actuales Factores:

DIAMETRO SELLO

Coded Factors

| $Y_{s\theta}$ | = | -118.275 | $Y1s$ | = | -118.275 |
|---------------|-------|-------------|--------------|--------------------------------|------------|
| -99.983125 | | Valor Nivel | -47.85027778 | | Valor Real |
| -17.004375 | * A | 1 | -0.113236111 | * Presión | 560 |
| -0.160625 | * B | 1 | -8645.277778 | * Avance | 0.003 |
| 0.373125 | * C | 1 | 14.86444444 | * Desg. HTA | 0 |
| -1.951875 | * AB | 1 | 11.26388889 | * Presión * Avance | 1.68 |
| 0.676875 | * AC | 1 | -0.024895299 | * Presión * Desg. HTA | 0 |
| -4.204375 | * BC | 1 | -7757.094017 | * Avance * Desg. HTA | 0 |
| 3.979375 | * ABC | 1 | 13.60470085 | * Presión * Avance * Desg. HTA | 0 |

La tabla 5.6 muestra los valores de los coeficientes del polinomio de segundo orden para la condición de nivel mínimo como valor de entrada, obteniendo el valor de respuesta de esfuerzos compresivos del modelo $Y_{b\theta} = -71.124$ kSI, comparando el valor real de los esfuerzos compresivos para la misma respuesta (diseño de experimento) en un $Y_{b\theta} = -71.248$; es decir un error entre el modelo estadístico del polinomio de segundo orden contra el experimento real de 0.124 %.

Mientras que la tabla 5.7 muestra los valores de los coeficientes del polinomio de segundo orden para la condición de nivel máximo como valor de entrada, obteniendo el valor de respuesta de esfuerzos compresivos del modelo $Y_{b\theta} = -96.4325$ kSI, comparando el valor real de los esfuerzos compresivos

para la misma respuesta (diseño de experimento) en un $Y_b\Theta = -96.4325$; es decir un error entre el modelo estadístico del polinomio de segundo orden contra el experimento real con una aproximación exacta.

Como se puede apreciar, el análisis de respuesta obtenido por ANOVA para el diseño de experimentos propuesto para cada uno de los diámetros del muñón diferencial, fue posible obtener una ecuación de un polinomio de segundo orden, que al resolver con el uso de una herramienta estadística (Design-Expert), se obtuvo un modelo de respuesta que permite encontrar los valores de esfuerzos compresivos con una alta aproximación siempre y cuando nos encontremos en el rango mínimo y máximo de las variables de entrada.

El hecho de tener una ecuación numérica de un modelo de respuesta de un fenómeno físico como lo es los esfuerzos compresivos a través de una técnica de rolado mecánico, nos permite conocer el comportamiento del sistema en cualquier condición de las variables de estudio sin necesidad de efectuar múltiples experimentos en los procesos de manufactura. En los siguientes subcapítulos analizaremos el análisis de combinación de variables sobre la respuesta de interés, siendo los valores compresivos por encima de la especificación funcional del componente, para $-60 \text{ kSI} < Y < -130 \text{ kSI}$

Tabla 5. 6. Obtención del valor de respuesta de esfuerzos compresivos Yb Θ para valor de nivel mínimo

Ecuación Final en Términos de los Actuales Factores:

DIAMETRO BALERO INTERIOR

Coded Factors

| Yb Θ | = | -71.124375 | Y2b | = | -71.24884615 |
|-------------|-------|-------------|--------------|--------------------------------|--------------|
| -71.124375 | | Valor Nivel | 26.39069444 | | Valor Real |
| -31.065 | * A | 0 | -0.241472222 | * Presión | 380 |
| 5.229375 | * B | 0 | -15162.91667 | * Avance | 0.002 |
| 1.618125 | * C | 0 | 24.02508547 | * Desg. HTA | -1.75 |
| 0.79375 | * AB | 0 | 34.45833333 | * Presión * Avance | 0.76 |
| 0.005 | * AC | 0 | -0.036965812 | * Presión * Desg. HTA | -665 |
| -7.298125 | * BC | 0 | -11517.90598 | * Avance * Desg. HTA | -0.0035 |
| 5.40875 | * ABC | 0 | 18.49145299 | * Presión * Avance * Desg. HTA | -1.33 |

Tabla 5. 7. Obtención del valor de respuesta de esfuerzos compresivos Yb Θ para valor de nivel máximo

Ecuación Final en Términos de los Actuales Factores:

DIAMETRO BALERO INTERIOR

Coded Factors

| Yb Θ | = | -96.4325 | Y2b | = | -96.4325 |
|-------------|-------|-------------|--------------|--------------------------------|------------|
| -71.124375 | | Valor Nivel | 26.39069444 | | Valor Real |
| -31.065 | * A | 1 | -0.241472222 | * Presión | 560 |
| 5.229375 | * B | 1 | -15162.91667 | * Avance | 0.003 |
| 1.618125 | * C | 1 | 24.02508547 | * Desg. HTA | 0 |
| 0.79375 | * AB | 1 | 34.45833333 | * Presión * Avance | 1.68 |
| 0.005 | * AC | 1 | -0.036965812 | * Presión * Desg. HTA | 0 |
| -7.298125 | * BC | 1 | -11517.90598 | * Avance * Desg. HTA | 0 |
| 5.40875 | * ABC | 1 | 18.49145299 | * Presión * Avance * Desg. HTA | 0 |

5.4 Obtención del modelo paramétrico de esfuerzos compresivos a través de la metodología VMEA

En el capítulo 3, se explica el desarrollo de la metodología para el MTPM, como se mostró en la Figura 3.1. Esta metodología se dividió en tres secciones, siendo la sección de VMEA. La cual se compone del cálculo de la varianza σ_{xi}^2 de las variables en estudio como lo expresa la ecuación (3.5), y la media μ_i de los datos la ecuación (3.6), que al obtener el cociente de la

desviación sobre el promedio de la población resulta en el riesgo r_i , los cuales son utilizados para obtener el análisis de sensibilidad para la priorización del riesgo $VRPN_i$ de la ecuación (3.10). Con la finalidad de obtener la priorización de los parámetros en el de impacto a la respuesta del proceso de manufactura (rolado del muñón de dirección).

La tabla 5.8 y 5.9 desglosan los valores de la varianza, desviación, media, riesgo y priorización de riesgo obtenidos del cálculo VMEA, para los resultados del diseño de experimentos del rolado de radios del diámetro de sello Ys1 y diámetro de balero interior Y2b, respectivamente.

En el caso de los resultados obtenidos para VMEA del diámetro de sello como se muestra en la tabla 5.8, los factores de mayor relevancia en el proceso lo determina el VPRN considerando de mayor a menor valor; en esta caso el factor de C: Desgaste de herramienta, presenta el mayor valor 5.06, y posteriormente el valor A: presión de la herramienta con un valor de 4.63 y finalmente el factor B: avance con 2.58. Mientras que la relación entre los factores resulta en un VPRN de 142.52 para “ABC”.

En el caso de los resultados obtenidos para VMEA del diámetro de balero interior como se muestra en la tabla 5.9, los factores de mayor relevancia en el proceso lo determina el VPRN considerando de mayor a menor valor; en esta caso el factor de C: Desgaste de herramienta, presenta el mayor valor 261.83, y posteriormente el valor A: presión de la herramienta con un valor de 51.60 y finalmente el factor B: avance con 27.35. Mientras que la relación entre los factores resulta en un VPRN de 263.29 para “ABC”.

Tabla 5. 8. VMEA para diámetro de sello Ys Θ

| Relación de factores | Ci (1) | Var (2) σ^2 | σ (3) | Mean E[Xi] (4) | Ci ² (5) | ri (6) | VPRNi (7) |
|-----------------------|------------|--------------------|--------------|-----------------|---------------------|--------|-----------|
| <i>A-Presión</i> | -17.004375 | 2313.190153 | 48.09563549 | 380 | 289.1488 | 0.13 | 4.63 |
| <i>B-Avance</i> | -1.60625 | 0.206403125 | 0.454316107 | 0.002 | 2.5800 | 1 | 2.58 |
| <i>C-Desg. HTA</i> | 3.73125 | 1.113778125 | 1.055356871 | 1.75 | 13.9222 | 0.60 | 5.06 |
| <i>AB</i> | -3.90375 | 30.47852813 | 5.520736194 | 0.76 | 15.2393 | 1 | 15.24 |
| <i>AC</i> | 1.35375 | 3.665278125 | 1.91449161 | 665 | 1.8326 | 0.0029 | 0.00002 |
| <i>BC</i> | -8.40875 | 141.4141531 | 11.89176829 | 0.0035 | 70.7071 | 1 | 70.71 |
| <i>ABC</i> | 11.938125 | 126.6834031 | 11.25537219 | 1.33 | 142.5188 | 1 | 142.52 |
| <i>Pure Error</i> | | 0.000018976 | | | | | |
| <i>Cov Total</i> | | 2616.751697 | | | | | |
| <i>VAR [Ysmodelo]</i> | | 2616.751697 | 373.821671 | | | | |

Tabla 5. 9. VMEA para diámetro de balero interior Yb Θ

| Relación de factores | Ci (1) | Var (2) s^2 | σ (3) | Mean Var (4) | Ci ² (5) | ri (6) | VPRNi (7) |
|-----------------------|--------|---------------|--------------|--------------|---------------------|------------|-----------|
| <i>A-Presión</i> | -31.07 | 7720.27 | 87.87 | 380 | 965.03 | 0.23122392 | 51.60 |
| <i>B-Avance</i> | 5.23 | 218.77 | 14.79 | 0.002 | 27.35 | 1 | 27.35 |
| <i>C-Desg. HTA</i> | 16.18 | 20.95 | 4.58 | 1.75 | 261.83 | 1 | 261.83 |
| <i>AB</i> | 1.5875 | 5.04 | 2.25 | 0.76 | 2.52 | 1 | 2.52 |
| <i>AC</i> | 0.01 | 0.0002 | 0.01414214 | 665 | 1E-04 | 0 | 0 |
| <i>BC</i> | -14.60 | 426.10 | 20.64 | 0.0035 | 213.05 | 1 | 213.05 |
| <i>ABC</i> | 16.23 | 234.04 | 15.30 | 1.33 | 263.29 | 1 | 263.29 |
| <i>Pure Error</i> | | 4.8504E-307 | | | | | |
| <i>CovTotal</i> | | 8625.169484 | | | | | |
| <i>VAR [Ysmodelo]</i> | | 8625.169484 | 1232.16707 | | | | |

5.4.1 Modelo Polinomial de Respuesta Diámetro de Sello

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el uso de la metodología de VMEA descrita en el capítulo 3 y resuelta con la herramienta de análisis estadístico Design-Expert V10, fue posible obtener el modelo polinomial de orden mayor para estimar esfuerzos residuales en el diámetro de Sello. La expresión polinomial de tercer orden, la cual está definida por la expresión algebraica que se muestra en la ecuación (5.1), considera las variables x1 a x3 y los factores presión (P), avance (FR), desgaste (WT), así como las relaciones entre los factores. Finalmente sustituyendo los coeficientes $a_{i,j,k}$ obtenidos al

resolver la ecuación (5.1), resulta en el modelo polinomial de respuesta para el proceso de rolado de diámetro de sello mostrado en la ecuación (5.2).

El modelo polinomial de respuesta de esfuerzos residuales de la ecuación (5.2) considerando obtenido del diseño de experimentos del diámetro de Sello es posible efectuar una validación a través de un RSM y comparar contra algunos de los resultados de los experimentos de referencia y/o efectuar un experimento de validación en el cual se establezcan las condiciones de las variables y medir la respuesta de los esfuerzos residuales en el espécimen, a través de una prueba experimental como rayos X, para después comparar contra el modelo.

Modelo Polinomial de Respuesta Diámetro de Sello

$$Y_{s\theta} = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + a_3 * X_3 + a_{1,2} * X_{(1,2)}^2 + a_{1,3} * X_{(1,3)}^2 + a_{2,3} * X_{(2,3)}^2 + a_{1,2,3} * X_{(1,2,3)}^3 \text{ ec. (5.1)}$$

Tabla 5. 10. (a) Valores y (b) variables para modelo polinomial de diámetro de Sello

| <i>Coef.</i> | <i>Valor</i> | <i>Variables</i> | <i>Factores</i> |
|--------------|--------------|-------------------|-----------------|
| a_0 | -99.983 | $X_1 =$ | Presión (P) |
| a_1 | -17.004 | $X_2 =$ | Avance (FR) |
| a_2 | -0.160 | $X_3 =$ | Desg. HTA (WT) |
| a_3 | 0.373 | $X_{(1,2)}^2 =$ | P*FR |
| $a_{1,2}$ | -1.951 | $X_{(1,3)}^2 =$ | P*WT |
| $a_{1,3}$ | 0.676 | $X_{(2,3)}^2 =$ | FR*WT |
| $a_{2,3}$ | -4.204 | $X_{(1,2,3)}^3 =$ | P*FR*WT |
| $a_{1,2,3}$ | 3.979 | | |

$$Y_{\theta s} = -47.850 - 0.1132 * P - 8645.27 * FR + 14.864 * WT + 11.263 * P * FR - 0.0248 * P * WT - 7757 * FR * WT + 13.6 P*FR*WT \text{ ec.(5.2)}$$

5.4.2 Modelo Polinomial de Respuesta Diámetro de Balero Interior

De acuerdo a los resultados obtenidos mediante el uso de la metodología de VMEA descrita en el capítulo 3 y resuelta con la herramienta de análisis estadístico Design-Expert V10, fue posible obtener el modelo polinomial de orden mayor para estimar esfuerzos residuales en el diámetro Balero Interior. La expresión polinomial de tercer orden, la cual está definida por la expresión algebraica que se muestra en la ecuación (5.3), considera las variables x_1 a x_3 y los factores Presión, Avance, Desgaste de Herramienta, así como las relaciones entre los factores. Finalmente sustituyendo los coeficientes $a_{i,j,k}$ obtenidos al resolver la ecuación (5.3), resulta en el modelo polinomial de respuesta para el proceso de rolado de diámetro de sello mostrado en la ecuación (5.4).

El modelo polinomial de respuesta de esfuerzos residuales de la ecuación (5.4) considerando obtenido del diseño de experimentos del diámetro Balero Interior es posible efectuar una validación a través de un RSM y comparar contra algunos de los resultados de los experimentos de referencia y/o efectuar un experimento de validación en el cual se establezcan las condiciones de las variables y medir la respuesta de los esfuerzos residuales en el espécimen, a través de una prueba experimental como rayos X, para después comparar contra el modelo.

Modelo Polinomial de Respuesta Diámetro Balero Interior

$$Yb\theta = a_0 + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + a_3 * X_3 + a_{1,2} * X_{(1,2)}^2 + a_{1,3} * X_{(1,3)}^2 + a_{2,3} * X_{(2,3)}^2 + a_{1,2,3} * X_{(1,2,3)}^3 \text{ ec. (5.3)}$$

Tabla 5. 11. (a) Valores y (b) variables para modelo polinomial de diámetro de Balero Interior

| <i>Coef.</i> | <i>Valor</i> | <i>Variables</i> | <i>Factores</i> |
|--------------|--------------|-------------------|-----------------|
| a_0 | -71.1244 | | |
| a_1 | -31.065 | $X1 =$ | Presión (P) |
| a_2 | 5.229375 | $X2 =$ | Avance (FR) |
| a_3 | 1.618125 | $X3 =$ | Desg. HTA (WT) |
| $a_{1,2}$ | 0.79375 | $X^2_{(1,2)} =$ | P*FR |
| $a_{1,3}$ | 0.005 | $X^2_{(1,3)} =$ | P*WT |
| $a_{2,3}$ | -7.29813 | $X^2_{(2,3)} =$ | FR*WT |
| $a_{1,2,3}$ | 5.40875 | $X^3_{(1,2,3)} =$ | P*FR*WT |

$$Yb\theta = 26.390 - 0.24147 * P - 15162.9 * FR + 24.025 * WT + 34.458 * P * FR - 0.036 * P * WT - 11517.9 * FR * WT + 18.491 P*FR*WT \quad \text{ec. (5.4)}$$

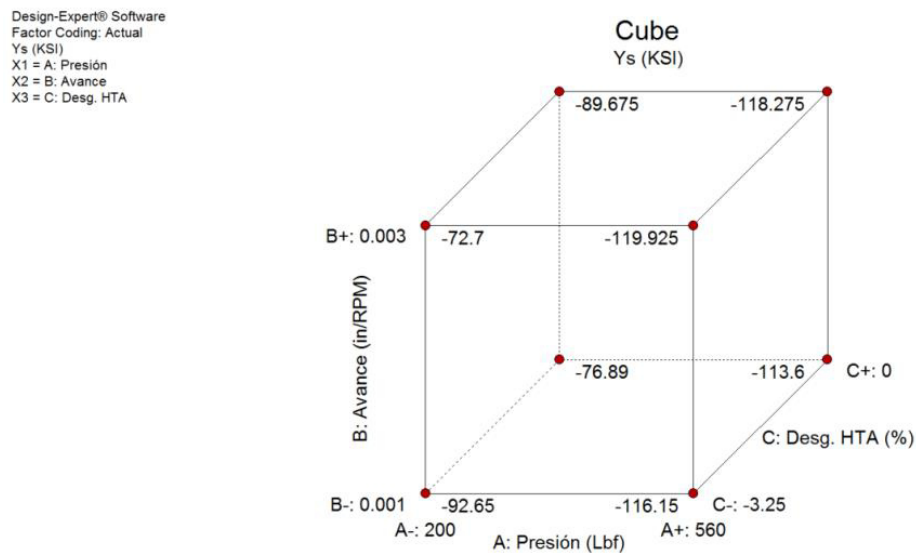
5.5 Resultados de la simulación de los modelos de respuesta para diámetro de Sello y diámetro de Balero Interior.

En el caso de los Modelos de respuesta tipo CCD (Diseño Compuesto Central), como se muestra en la Figura 5.3, se observa el cubo del diámetro de Sello (a), el cual muestra el universo de respuesta del diámetro de sello Y1s contenido en los vértices del cubo de solución. Mientras el cubo del diámetro de Balero Interior (b) muestra el universo de respuestas de esfuerzo residuales para el diámetro de balero interior Y2b, en ambos casos los límites están definidos por el rango en el que se evalúa el rango del valor mínimo y máximo de cada factor que se evalúa.

La manera gráfica de mostrar una solución de respuesta tipo CCD, ayuda a comprender los límites de frontera de una solución numérica donde es válido el modelo parametrizado para la solución propuesta, de tal manera que es posible encontrar el comportamiento puntualmente, en cada plano, y en un espacio determinado del cubo de solución.

Las figuras de respuesta que en lo sucesivo se mostrará, obedece a analizar condiciones puntuales del comportamiento de respuesta lineal de los factores de estudio como son Presión (A), Avance (B) y Desgaste de la herramienta (C); que modifican el valor de respuesta de los valores residuales en el diámetro de Sello y diámetro de Balero Interior. En el caso de la respuesta lineal de los factores, se muestra en las Figuras 5.4 y 5.5; por otra parte, el análisis de superficie respuesta es mostrado en las Figuras 5.6 y 5.7, y finalmente análisis de variación de respuesta se muestra en las Figuras 5.8 y 5.9.

(a) Diámetro Sello



(b) Diámetro de Balero Interior

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Y2b (KSI)
 X1 = A: PRESION
 X2 = B: AVANCE
 X3 = C: DESG. HTA

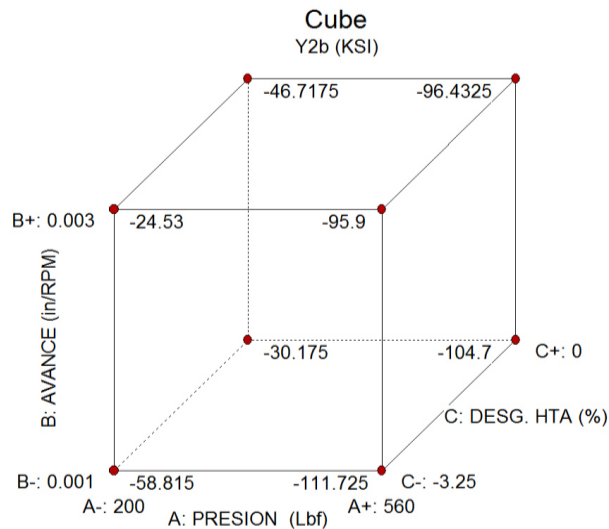


Figura 5. 3. Modelos de respuesta tipo CCD (Diseño Compuesto Central): el cubo (a) muestra el cubo de respuesta del diámetro de sello Y1s. Mientras, el cubo (b) muestra la respuesta del diámetro de balero interior Y2b

En la Figura 5.4, se muestra la respuesta lineal de cada factor involucrado en la interacción múltiple para la respuesta Y1s (kSI). Para el caso del factor Presión de rolado de la gráfica Figura 5.4 (a), se observa que a medida que aumenta la presión (lbf/in^2) los esfuerzos compresivos aumentan de manera proporcional pasando de -75 a -120 kSI, para una presión correspondiente de 200 a 560 lbf/in^2 , respectivamente.

Por otro lado el factor de avance de la Figura 5.4 (b), el valor de respuesta Y1s se ve afectado de manera inversamente proporcional, obteniendo un valor de esfuerzos compresivos de -102 a -95 kSI, conforme se ve incrementada el avance de la herramienta de rolado de 0.001 a 0.003 in/RPM.

En el caso del factor de Desgaste de la Herramienta Figura 5.4 (c), el valor de respuesta Y1s se ve afectado de manera proporcional al porcentaje de desgaste de la herramienta, en un rango de afectación de -95 a -100 kSI, para Desgaste de Herramienta de -3.5% a 0%; es decir conforme la herramienta se empieza a desgastar los esfuerzos residuales por rolado en el material se degradan de la misma manera, teniendo un efecto relativamente importante.

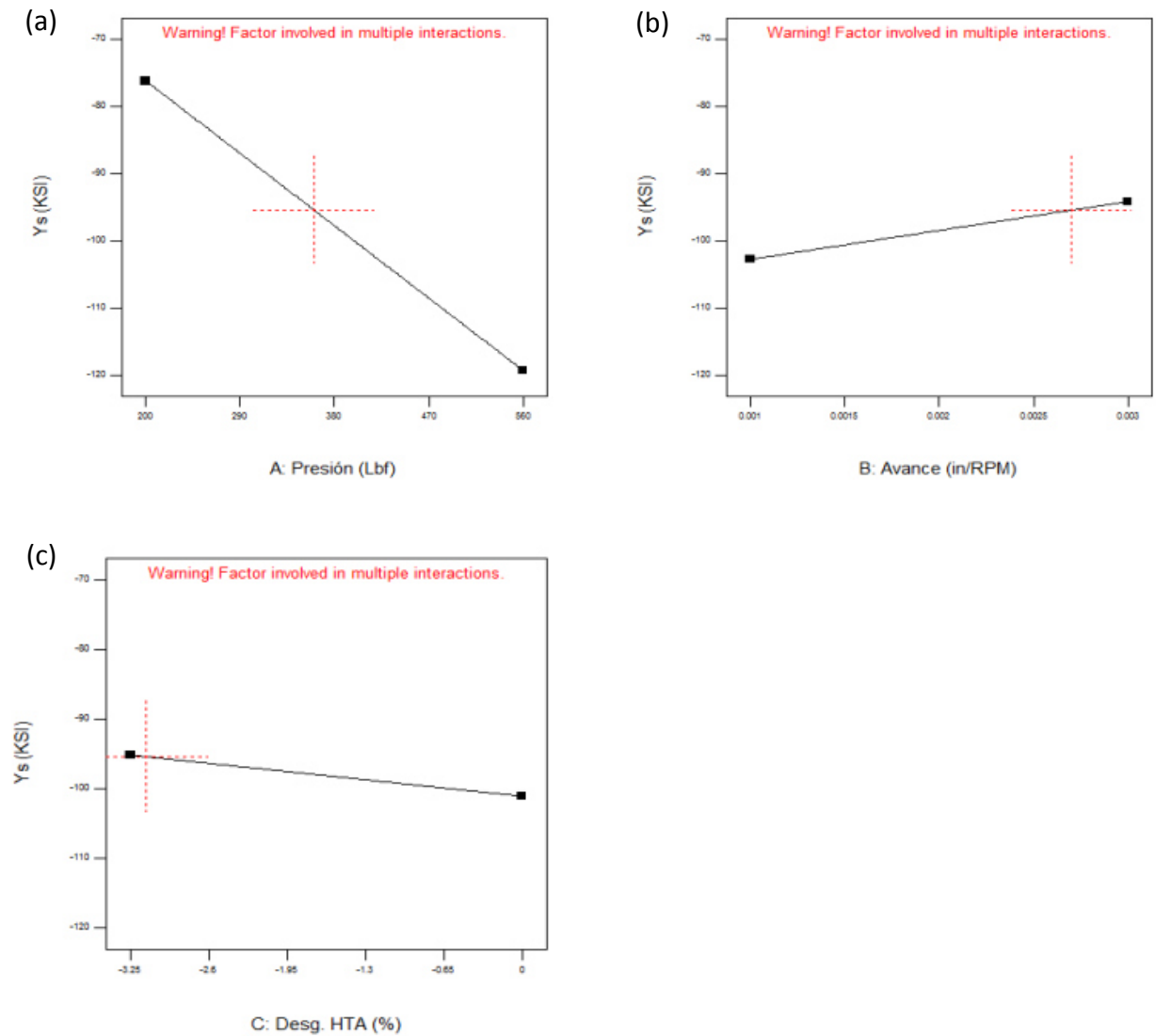


Figura 5. 4. Respuesta lineal de cada factor involucrado en interacción múltiple para Y_{1s} (kSI)

En la Figura 5.5, se muestra la respuesta lineal de cada factor involucrado en la interacción múltiple para la respuesta Y_{2b} (kSI). Para el caso del factor Presión de rolado de la gráfica Figura 5.5 (a), se observa que a medida que aumenta la presión (lbf/in^2) los esfuerzos compresivos aumentan de manera proporcional pasando de -40 a -110 kSI, para una presión correspondiente de 200 a 560 lbf/in^2 , respectivamente. Que al comparar contra

el diámetro de Sello (Y1s), los esfuerzos compresivos alcanzados son mayores con respecto al diámetro de Balero Interior (Y2b).

Por otro lado el factor de avance de la Figura 5.5 (b), el valor de respuesta Y1s se ve afectado inversamente proporcional, obteniendo un valor de esfuerzos compresivos de -60 a -25 kSI, conforme se ve incrementada el avance de la herramienta de rolado de 0.001 a 0.003 in/RPM.

En el caso del factor de Desgaste de Herramienta Figura 5.5 (c), el valor de respuesta Y2b se ve afectado inversamente proporcional al porcentaje de desgaste de herramienta, en un rango de afectación de -45 a -40 kSI, para Desgaste de Herramienta de -3.25% a 0%; es decir conforme la herramienta se empieza a desgastar los esfuerzos residuales por rolado en el material cambian de la misma manera, teniendo un efecto de baja sensibilidad, es decir casi constante.

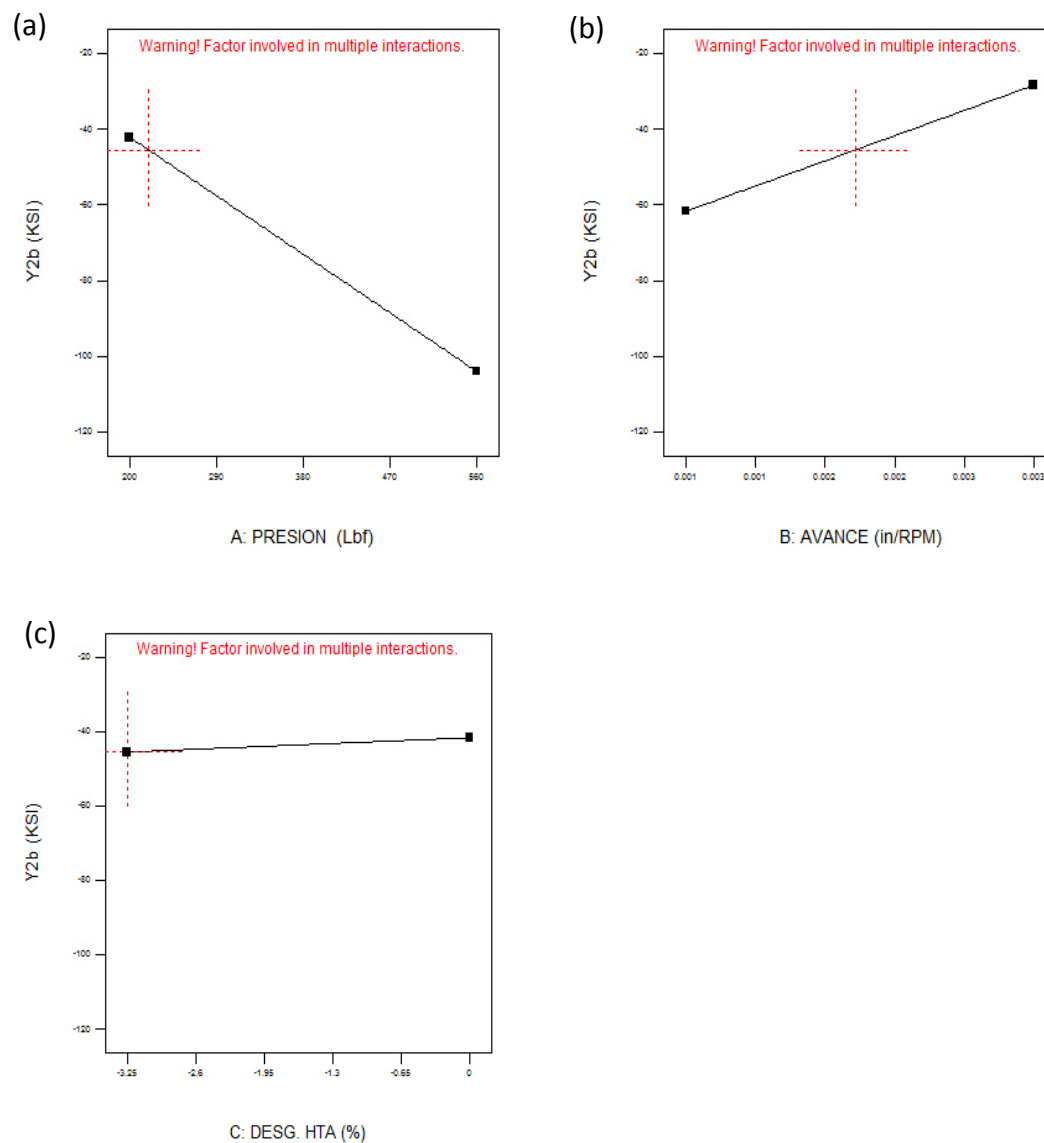


Figura 5. 5. Respuesta lineal de cada factor involucrado en interacción múltiple para Y2b (kSI)

El análisis de superficie de respuesta para la Figura 5.6, correspondiente al diámetro de Sello, muestra en un avance de 0.003 in/RPM y una presión de 200 lbf/in² con un desgaste de herramienta del -3.25%, genera esfuerzos compresivos bajos de -72.7 kSI, muy cercano a la especificación límite inferior del componente (-60 kSI). Mientras que con un avance de 0.001 in/RPM y una presión de 560 lbf/in² y con el mismo valor de desgaste de la herramienta se obtiene un esfuerzo compresivo de -120 kSI, considerando el mayor esfuerzo residual obtenido en el diámetro de Sello, en un muñón de dirección automotriz.

El análisis de superficie de respuesta para el diámetro de Balero Interior, de la Figura 5.7, muestra en un avance de 0.003 in/RPM y una presión de 200 lbf/in² con un desgaste de herramienta del -3.25%, genera esfuerzos compresivos muy bajos de -24.53 kSI, lo cual hace que quede fuera de la especificación límite inferior del componente. Mientras, un avance de 0.001 in/RPM y una presión de 560 lbf/in², en el mismo valor de desgaste de la herramienta, se obtiene un esfuerzo compresivo de -111.725 kSI, considerando el mayor esfuerzo residual obtenido en el diámetro de Balero Interior.

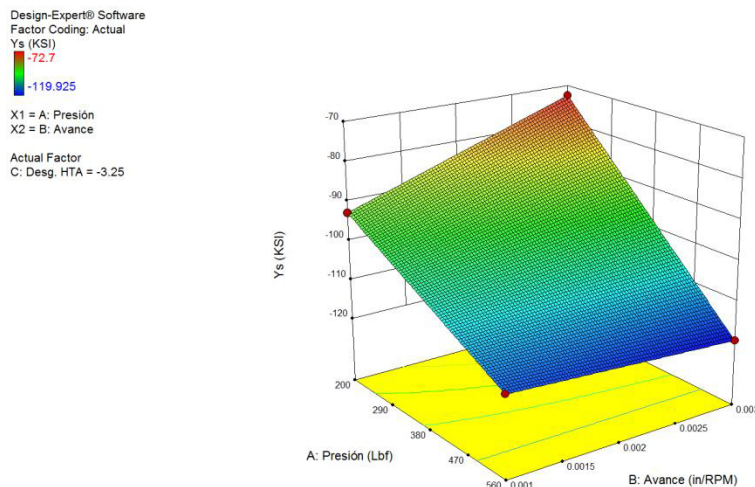


Figura 5. 6. Superficie de respuesta para diámetro de Sello (Y1s) considerando constante el factor C: desgaste de herramienta en -3.25%

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Y2b (KSI)
 -24.53
 -111.725
 X1 = A: PRESION
 X2 = B: AVANCE
 Actual Factor
 C: DESG. HTA = -3.25

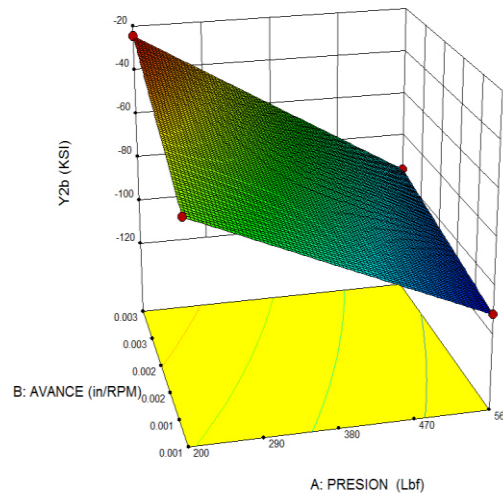


Figura 5. 7. Superficie de respuesta para diámetro de Balero Interior (Y2b) considerando constante el factor C: desgaste de herramienta en -3.25%

En un análisis de variación de respuesta como se muestra en la Figura 5.8 para el diámetro de Sello, es posible apreciar las franjas de magnitudes de esfuerzos residuales en función de la magnitud del avance de la herramienta versus presión aplicada. La condición crítica se observa a porcentos de avance mayores 0.0015 In/RPM y presiones por debajo de 300 lbf/in². Siendo el área de transición de amarillo a rojo. Esta zona crítica de bajos esfuerzos residuales presenta un desplazamiento mayor en el caso del Balero Interior Y2b como se muestra en la Figura 5.9.

Es importante hacer notar que la magnitud de desgaste de la herramienta de trabajo afecta severamente el contenido de esfuerzos residuales en el proceso de rolado de los diámetros de Sello y Balero Interior para el muñón de dirección. En el caso de desgastes extremos se observa en la Figura 5.8 y Figura 5.9, que aun mejorando el factor de presión, el valor de esfuerzo residual Y1s para el diámetro de Sello es muy superior al obtenido en el diámetro de Balero Interior Y2b, respectivamente. En el caso de que la presión de trabajo estuviera cercana al límite inferior 200 lbf/in² y el avance de la herramienta estuviera también cercano al límite superior 0.003 In/RPM, los

esfuerzos residuales del diámetro de Balero Interior estarían fuera de especificación, siendo mucho más sensible que los esfuerzos medidos en el diámetro de Sello, para la misma condición de parámetros.

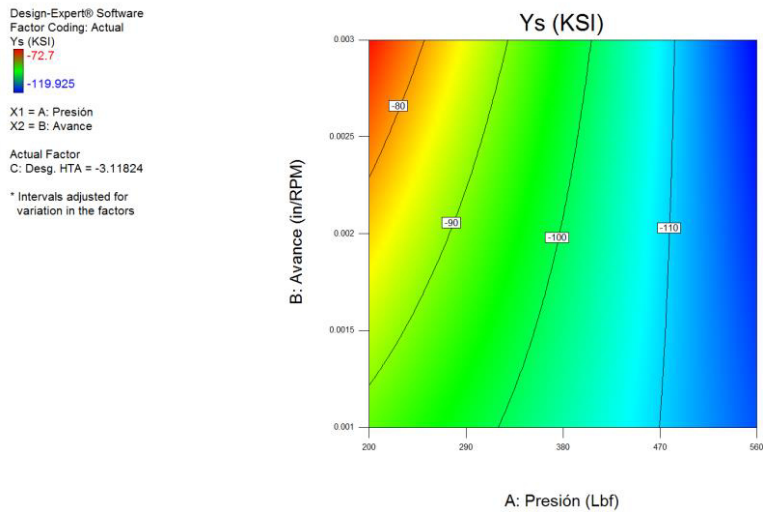


Figura 5. 8. Variación de respuesta para Sello (Ys) considerando un desgaste de herramienta de -3.11%

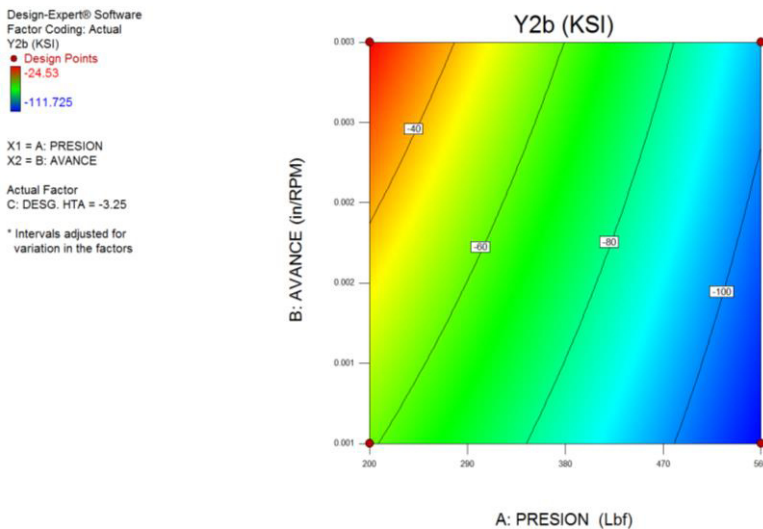


Figura 5. 9. Variación de respuesta para Balero Interior (Y2b) considerando un desgaste de herramienta de -3.25%

El análisis de superficie de respuesta para la Figura 5.10, (a), (b) correspondiente al diámetro de Sello, muestra un desgaste de herramienta del -3.25% y una presión de 200 lbf/in² con un avance de herramienta de 0.0027 in/RPM, generando esfuerzos compresivos de -76 kSI, muy cercano a la especificación límite inferior del componente (-60 kSI). Mientras que con el mismo desgaste de herramienta de -3.25% y una presión de 560 lbf/in² y con el mismo valor de avance de herramienta, se obtiene un esfuerzo compresivo de -119 kSI, considerando el mayor esfuerzo residual obtenido en el diámetro de Sello, en un muñón de dirección automotriz.

Para el análisis de superficie de respuesta del diámetro de Balero Interior, de la Figura 5.11, (a), (b), muestra un desgaste de herramienta del -3.25% y una presión de 200 lbf/in² con un avance de herramienta de 0.0027 in/RPM, donde se generan esfuerzos compresivos muy bajos de -40 kSI, lo cual hace que quede fuera de la especificación límite inferior del componente. Mientras que, el mismo desgaste de herramienta del -3.25% y una presión de 560 lbf/in², con el mismo valor de avance de herramienta, se obtiene un esfuerzo compresivo de -100 kSI, considerando el mayor esfuerzo residual obtenido en el diámetro de Balero Interior.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
Ys (KSI)
-72.7
-119.925
X1 = A: Presión
X2 = C: Desg. HTA
Actual Factor
B: Avance = 0.0027027

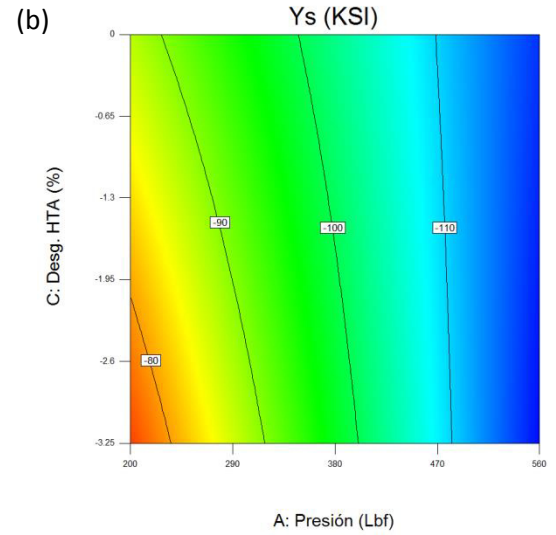
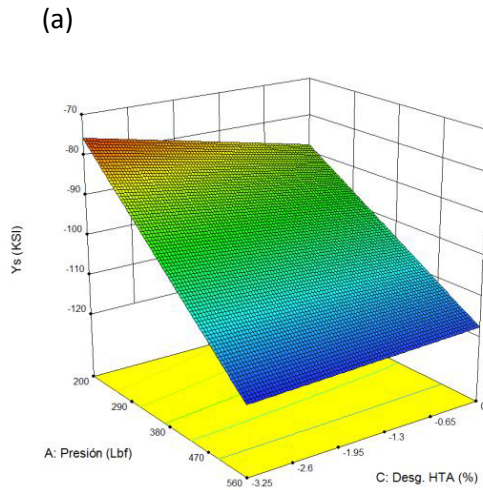


Figura 5. 10. (a) Superficie de respuesta para diámetro de Sello (Y1s) considerando constante el factor B: avance de herramienta en 0.0027 in/RPM. (b) Análisis de respuesta que muestra el mapa de perfiles de isoesfuerzos sobre la superficie del diámetro de Sello

Design-Exper
Factor Coding
Y2b (KSI)
-24.53
-111.725
X1 = A: PRE
X2 = C: DES
Actual Factor
B: AVANCE =

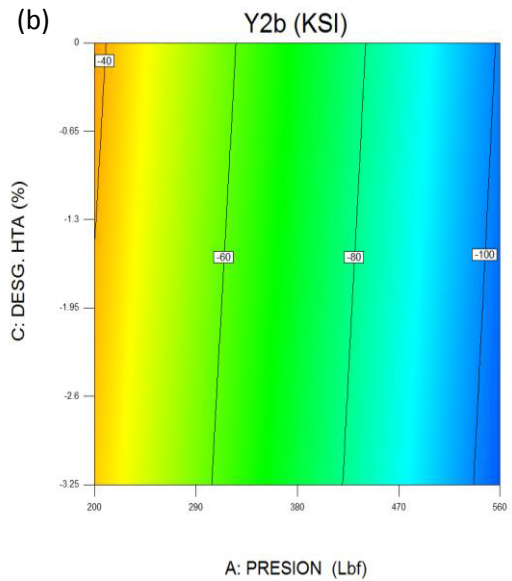
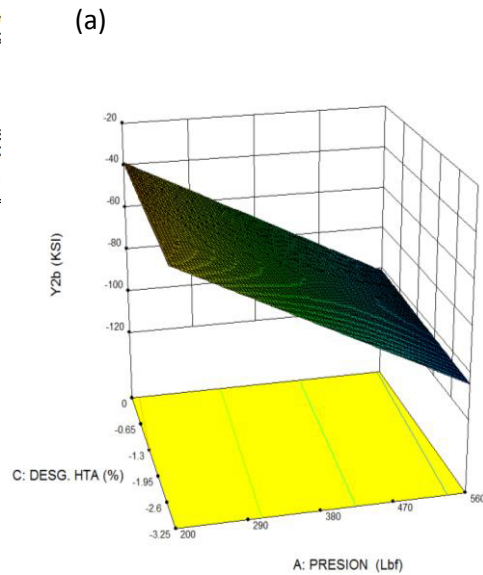


Figura 5. 11. (a) Superficie de respuesta para diámetro de Balero (Y2b) considerando constante el factor B: avance de herramienta en 0.002 in/RPM. (b) Análisis de respuesta que muestra el mapa de perfiles de isoesfuerzos sobre la superficie del diámetro de Balero

Sobre el análisis de superficie de respuesta para la Figura 5.12 (a), (b), correspondiente al diámetro de Sello, se muestra un avance de 0.003 In/RPM y un desgaste de herramienta del -3.25%, con una presión constante de 263.24 lbf/in², donde se generan esfuerzos compresivos de -82 kSI. Mientras que con un avance de 0.001 In/RPM y un desgaste de herramienta del -3.25% y con el mismo valor de presión se obtiene un esfuerzo compresivo de -95 kSI, considerando el mayor esfuerzo residual obtenido en el diámetro de Sello, en un muñón de dirección automotriz.

Finalmente, para el análisis de superficie de respuesta del diámetro de Balero Interior, de la Figura 5.13 (a), (b), muestra un avance de 0.003 In/RPM y un desgaste de herramienta del -3.25%, con una presión constante de 219 lbf/in², genera esfuerzos compresivos muy bajos de -30 kSI, lo cual hace que quede fuera de la especificación límite inferior (-60 kSI) del componente. Mientras que, un avance de 0.001 In/RPM y un desgaste de herramienta del -3.25%, con el mismo valor de presión, se obtiene un esfuerzo compresivo de -60 kSI, considerando el mayor esfuerzo residual obtenido en el diámetro de Balero Interior.

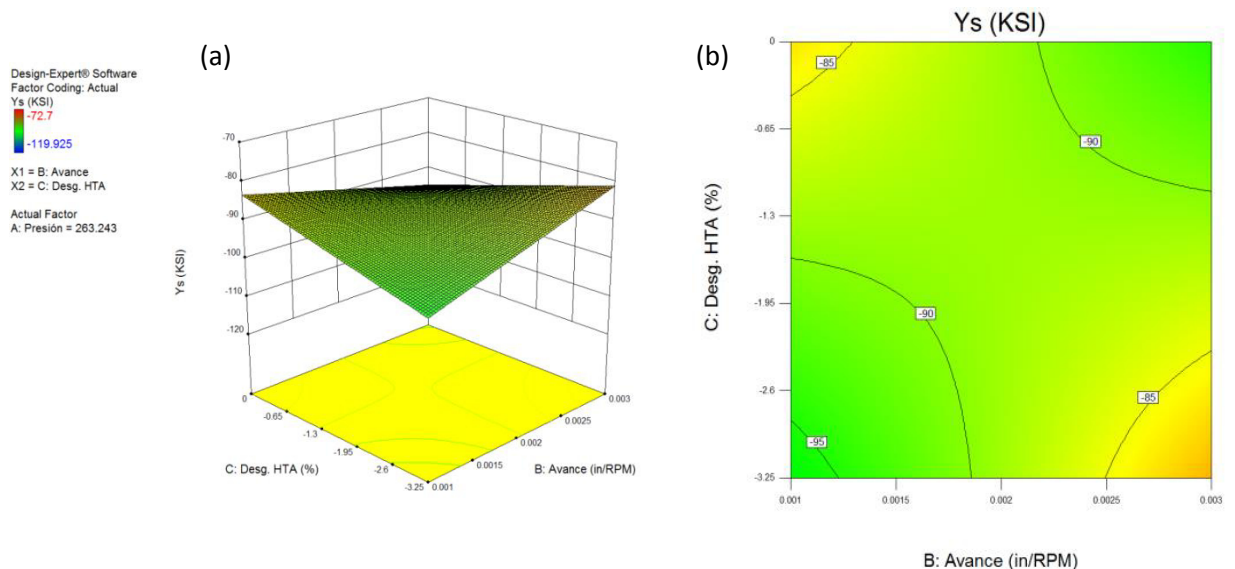


Figura 5. 12. (a) Superficie de respuesta para diámetro Sello (Y_{1s}) considerando constante el factor A: presión de la herramienta en 263.24 lbf/in². (b) Análisis de respuesta que muestra el mapa de perfiles de isoefuerzos sobre la superficie del diámetro de Sello

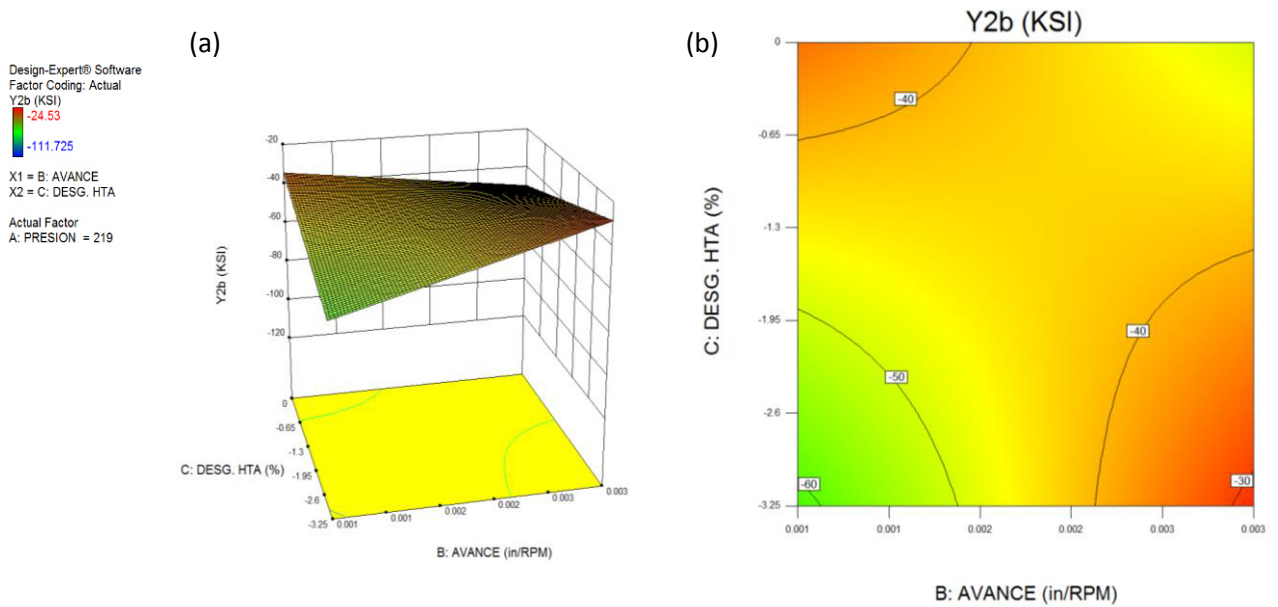


Figura 5. 13. (a) Superficie de respuesta para diámetro de Balero (Y2b) considerando constante el factor A: presión de la herramienta en 219 lbf/in². (b) Análisis de respuesta que muestra el mapa de perfiles de isoesfuerzos sobre la superficie del diámetro Balero

La Figura 5.14 muestra la condición óptima para la respuesta de esfuerzos residuales en el diámetro de Sello Y1s, así mismo indica en el eje de la desviación al punto de referencia hasta una variación de -2 a +2 del valor óptimo, que se encuentra por arriba de -108 kSI, para los valores de los factores (A, B, C) de 469, 0.001 y -1.6; que corresponden a las variables de Presión (lbf/in²), Avance (ln/RPM) y Desgaste de Herramienta (%). Es decir, la condición óptima de los esfuerzos residuales en el diámetro de Sello Y1s, considerando la desviación estándar de las variables del proceso de rolado en hasta 2σ , no afecta el valor de respuesta, quedando protegido y lo suficientemente por debajo del límite de referencia de la especificación de esfuerzos residuales para el muñón siendo de -60 kSI.

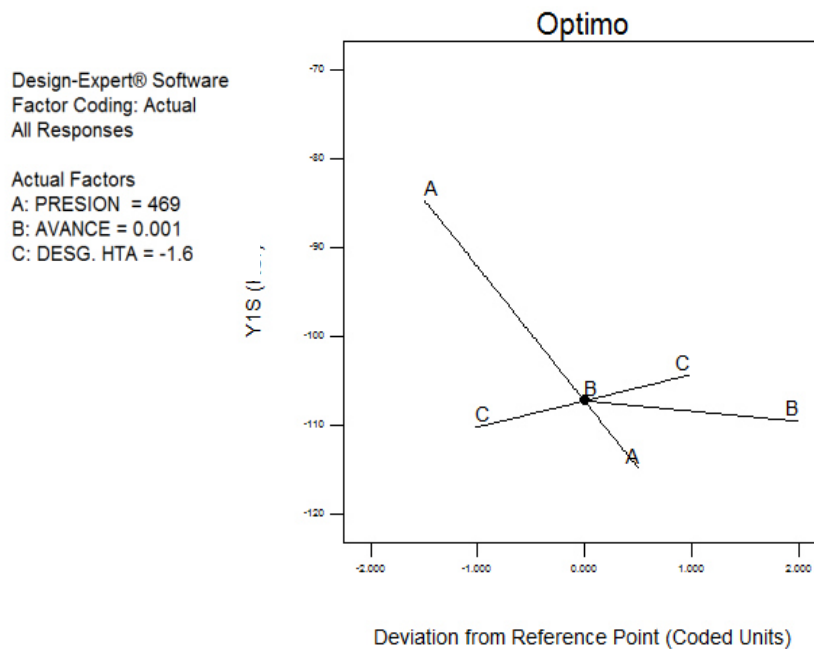


Figura 5. 14. Obtención de la condición óptima para la respuesta de Diámetro de Sello (Y1s)

La Figura 5.15 muestra la condición óptima para la respuesta de esfuerzos residuales en el diámetro de Balero Interior Y2b, así mismo indica en el eje de la desviación al punto de referencia hasta una variación de -2 a +2 del valor óptimo, que se encuentra en -98 kSI, para los valores de los factores (A, B, C) de 469, 0.001 y -1.6; que corresponden a las variables de Presión (lbf/in²), Avance (ln/RPM) y Desgaste de Herramienta (%). Es decir, la condición óptima de los esfuerzos residuales en el diámetro de Balero Interior Y2b, considerando la desviación estándar de las variables del proceso de rolado en hasta 2σ , no afecta el valor de respuesta, quedando protegido y lo suficientemente por debajo del límite de referencia de la especificación de esfuerzos residuales para el muñón. Aunque el valor óptimo del Balero Interior está por encima de los esfuerzos residuales del Sello como se mostró en la Figura 5.14, esto garantiza que ambos rolados del mismo producto (muñón diferencial), se encuentran dentro de la especificación de manufactura, sin importar la variación del proceso.

Design-Expert® Software
Factor Coding: Actual
All Responses

Actual Factors
A: PRESION = 469
B: AVANCE = 0.001
C: DESG. HTA = -1.6

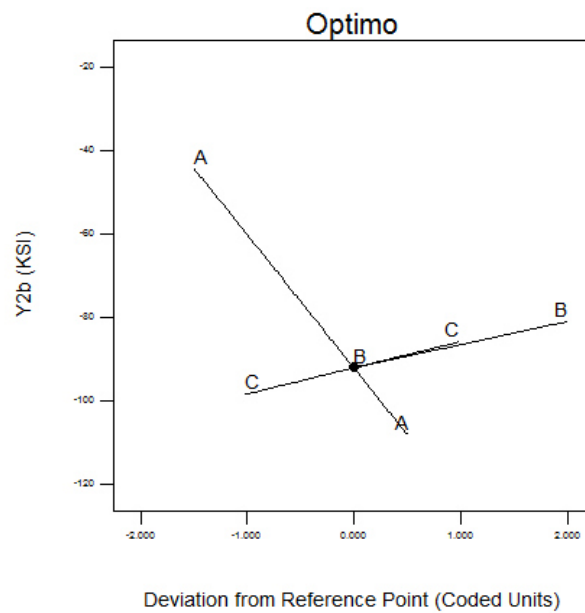


Figura 5. 15. Obtención de la condición óptima para la respuesta de Diámetro Balero Interior (Y2b)

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para esta investigación, de acuerdo a los resultados obtenidos mediante el uso de la metodología de VMEA descrita en el capítulo 2 y resuelta con la herramienta de análisis estadístico Design-Expert V10, fue posible obtener el modelo polinomial de orden mayor para estimar esfuerzos residuales tanto en el diámetro Sello como el diámetro de Balero Interior, así como también obtener los valores óptimos para cada una de las tres variables que se consideraron en este estudio: Presión de la Herramienta (lbf/in^2), Avance de la Herramienta (in/RPM) y Desgaste de la Herramienta (%)

Los modelo polinomiales de respuesta de esfuerzos residuales de la ecuaciones (5.2) y (5.4) considerando obtenido del diseño de experimentos para ambos diámetros (Sello y Balero Interior) es posible efectuar una validación a través de un análisis de superficie de respuesta (RSM) y comparar contra algunos de los resultados de los experimentos de referencia y/o efectuar un experimento de validación en el cual se establezcan las condiciones de las variables y medir la respuesta de los esfuerzos residuales en el espécimen, a través de una prueba experimental como rayos X, para después comparar contra el modelo y validarlo.

Se obtuvieron los modelos de respuesta tipo CCD (Diseño Compuesto Central), y condición óptima para la respuesta como se muestra en la Figura 5.14 y 5.15, lo que permite conocer los valores óptimos de las variables en la mejor respuesta posible para el rolado de radios en muñones, permitiendo que garantizar que ambos diámetros se encuentren dentro de la especificación de esfuerzos residuales requerida en la condición más crítica del desgaste de la herramienta, entre -1.6 % a -3.25 %; tomando en consideración las tres variables que se midieron: Presión, Avance y Desgaste de Herramienta.

En el caso del mayor desgaste de la herramienta en el rolado (-1.6 %), se evalúa para ambos diámetros la magnitud de esfuerzos residuales obtenida, para los siguientes valores óptimos en las variables del sistema de rolado de radios en muñones:

Diámetro de Sello Y1s= -108 kSI

- A: Presión (lbf/in²) = 469
- B: Avance (ln/RPM) = 0.001
- C: Desgaste de Herramienta (%) = -1.6

Diámetro de Balero Interior: Y2b = -98 kSI

- A: Presión (lbf/in²) = 469
- B: Avance (ln/RPM) = 0.001
- C: Desgaste de Herramienta (%) = -1.6

En el caso del mayor desgaste de la herramienta en el rolado (-3.25%), se evalúa para ambos diámetros la magnitud de esfuerzos residuales obtenida, para los siguientes valores en las variables del sistema de rolado de radios en muñones:

Diámetro de Sello Y1s= -82 kSI

- A: Presión (lbf/in²) = 263.24
- B: Avance (ln/RPM) = 0.003

- C: Desgaste de Herramienta (%) = -3.25

Diámetro de Balero Interior: Y2b = -30 kSI

- A: Presión (lbf/in²) = 219
- B: Avance (In/RPM) = 0.003
- C: Desgaste de Herramienta (%) = -3.25

Bajo esta consideración se cumple por análisis VMEA propuesto con este método de determinación de parámetros críticos, que el factor C: Desgaste de la Herramienta; es la variable de mayor afectación al valor de respuesta de los esfuerzos residuales.

Como trabajos a futuro de acuerdo a las conclusiones actuales, se recomienda:

1. Implementar los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación al proceso actual de rolado de radios para muñón de dirección.
2. Determinar ahorro económico para cada una de las variables que se consideraron.
3. Realizar DOE en las demás variables faltantes o PIT's (ver Tabla 1.1) para revisar el impacto de cada una de ellas en el componente muñón.
4. Revisar otros procesos dentro de SISAMEX para aplicar metodología VMEA.

REFERENCIAS

1. **Díaz, Macarena.** "El nafta". [En línea] 2003.
<http://www.monografias.com/trabajos12/nafta/nafta.shtml>.
2. **México, Gobierno.** CPTPP (Tratado Integral y Progresista de Asociación Transpacífico). [En línea] 2017. https://www.gob.mx/tratado-de-asociacion-transpacifico#que_es.
3. **Mechanic, Master.** Steering Knuckle. [En línea] 2015.
<http://www.mastermechanic.ca/inspection/steering-knuckle.php>.
4. **Flott, Leslie W.** Fault Tree Analysis Helps Explain the Reasons "Why?". [En línea] 2013.
www.metalfinishing.com.
5. **Digital, Biblioteca.** PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DEL AMEF. [En línea] 2016.
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/2570/Capitulo6.pdf>.
6. *Using Failure Mode and Effects Analysis to design a comfortable automotive driver seat.* **Kolich, Mike.** Michigan : Elsevier Ltd and The Ergonomic Society, 2014.
7. *Variation Mode and Effect Analysis compared to FTA and FMEA in Product Development.* **Pavasson, Jonas y Karlberg, Magnus.** Luleå : Luleå University of Technology, 2011.
8. **Pilot, Simha.** ¿Qué es un Análisis Árbol de Falla? [En línea] 2002. <http://asq.org/quality-progress/2002/03/problem-solving/que-es-un-analisis-arbol-de-falla.html>.
9. **Texas, El Centro de Recursos del Departamento de Seguro de.** El Análisis de Fallas con Diagramas de Árbol. [En línea] 2015.
<https://www.tdi.texas.gov/pubs/videoresourcessp/spstpfaulttree.pdf>.
10. **Solutions, Lean.** AMEF, Análisis De Modo Y Efecto De La Falla. [En línea] 2014.
<http://www.leansolutions.co/conceptos/amef/>.
11. **Becerril, Israel.** AMEF como parte del PPAP de nuevos productos en el área de juntas de calidad. [En línea] 2013. http://reaxion.utleon.edu.mx/art_AMEF_como_parte_del_PPAP.html.
12. **Reyes, Primitivo.** ANALISIS DEL MODO Y EFECTO DE FALLA (AMEF). [En línea] 2016.
<http://www.icicm.com/files/CurAMEF.pdf>.
13. *Variation Mode and Effect Analysis: a Practical Tool for Quality Improvement.* **Johansson, Per, y otros, y otros.** Gothenburg : Wiley InterScience, 2006.
14. **González, Rodrigo.** DFSS, metodología para el desarrollo de nuevos productos. [En línea] 2013. <https://www.pdcahome.com/4080/dfss-metodologias-para-el-desarrollo-de-nuevos-productos/>.

15. *Introducción a seis sigma*. **Manivannan, Subramaniam**. Michigan : Metalforming, 2007.
16. **Bergman, Bo, Jacques de Maré, Sara Lorén y Svensson, Thomas**. *Robust Design Methodology for Reliability*. Gran Bretaña : Wiley, 2009.
17. *Probabilistic Variation Mode and Effect Analysis: A Case Study of an Air Engine Component*. **Johannesson, Pär, Svensson, Thomas y Samuelsson, Leif**. Helsingborg : Linköping University Electronic Press, 2007.
18. *Reliability Prediction Based on Variation Mode and Effect Analysis*. **Pavasson, Jonas, y otros, y otros**. s.l. : Wiley Online Library, 2012.
19. *Design of Experiment based on VMEA (Variation Mode and Effect Analysis)*. **Cronholm, Kent**. Gotemburgo : Elsevier Ltd., 2013.
20. **Investopedia**. Analysis Of Variance - ANOVA. [En línea] 2017.
<https://www.investopedia.com/terms/a/anova.asp>.
21. **Minitab**. ¿Qué es ANOVA? [En línea] 2016. <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/modeling-statistics/anova/basics/what-is-anova/>.
22. **Barcelona, Universitat de**. ANÁLISIS DE LA VARIANZA CON UN FACTOR (ANOVA). [En línea] 2015. http://www.ub.edu/aplica_infor/spss/cap4-7.htm.
23. **BRADFORD, University of**. Response surface methodology. [En línea] 2016.
https://www.brad.ac.uk/staff/vtoropov/burgeon/thesis_luis/chapter3.pdf.
24. **Myers, Raymond, Montgomery, Douglas y Anderson, Christine**. *Response Surface Methodology*. New Jersey : Wiley, 2009.
25. *Response surface methodology*. **Khuri, André y Mukhopadhyay, Siuli**. New York : Wiley Online Library, 2010.
26. **Bernal, Jorge Jimeno**. Diseño de experimentos (DOE): Para que sirve y cómo realizarlo. [En línea] 06 de Noviembre de 2012. <https://www.pdcahome.com/2117/diseño-de-experimentos-para-que-sirve-y-como-realizarlo/>.
27. **Group, SPC Consulting**. <https://spcgroup.com.mx/doe/>. [En línea] 10 de Enero de 2013.
<https://spcgroup.com.mx/doe/>.
28. **Calidad, Centro de Ingeniería de la**. Diseño y Análisis de Experimentos - DOE. [En línea] <http://cicalidad.com/nuestros-servicios-de-consultoria/diseño-y-análisis-de-experimentos-doe/>.
29. *Design Expert 7*. **Buxton, Richard**. s.l. : Mathematics Learning Support Centre, 2007.

30. **Stat-Ease**. V10 of Design-Expert Software: Top Tool for Design of Experiments (DOE). [En línea] https://www.statease.com/pubs/why_DX10_tops.pdf.
31. **MotorGiga**. Definición de Mangueta. [En línea] 1998.
<https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/mangueta-definicion-significado/gmx-niv15-con194731.htm>.
32. **C.V., Sistemas Automotrices de México S.A. de**. Productos, muñón de dirección. [En línea] 2011. www.sisamex.com.mx/es/productos.html.
33. *Evaluation of metal matrix composite to replace spheroidal graphite iron for a critical component, steering knuckle*. **Vijayarangan, S., Rajamanickam, N. y Sivananth, V.** s.l. : Elsevier, 2013.
34. **Group, All Metals & Forge**. AISI / ALLOY STEEL 4135. [En línea] 2013.
<http://www.steelforge.com/aisi-4135/>.
35. **AZoM**. AISI 4135 Alloy Steel (UNS G41350). [En línea] 2012.
<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6676>.
36. **Arias, Ruben**. *Cuestionario - Fresadora*. Tlalnepantla De Baz : Centro de Bachillerato Tecnológico industrial y de servicios No. 50, 2012.
37. **Herramienta, Instituto Máquina**. Mecanizado por arranque de viruta. *Torneado*. [En línea] <http://www.imh.eus/es/comunicacion/dokumentazio-irekia/manuales/introduccion-a-los-procesos-de-fabricacion/conformacion-por-mecanizado/mecanizado-por-arranque-de-viruta/torneado>.
38. **Tecnología, Area**. Torno. *¿Qué es un torno?* [En línea] <http://www.areatecnologia.com/herramientas/torno.html>.
39. **Levinson, Aceros**. ¿Que es el maquinado? [En línea] 2018.
<http://www.aceroslevinson.com/2016/11/que-es-el-maquinado/>.
40. **Hurco**. CNC Mill Turn. *Finish the Part with One Machine on a CNC Mill Turn*. [En línea] <http://www.hurco.com/en-us/cnc-machine-tools/turning-centers/mill-turn/PublishingImages/TMM-live-tooling.jpg>.
41. **Anónimo**. Temple y Revenido. *¿Qué es el temple?* [En línea] 2018.
https://nanopdf.com/download/temple-y-revenido_pdf.
42. **Bodycote**. Revenido. [En línea] <https://www.bodycote.com/es/servicios/tratamiento-termico/temple-y-revenido/revenido/>.
43. **García, Nancy**. Tratamientos térmicos. [En línea] 2015.
http://informesmk4nancy120.blogspot.com/2015_08_01_archive.html.

44. *PROCESOS DE MANUFACTURA II*. **Hernandez, Hector, y otros, y otros**. Bogotá : ESCUELA COLOMBIANA DE CARRERAS INDUSTRIALES ECCI, 2013.
45. **MECÁNICA, GRUPO TECNOLOGÍA**. Procesos de Fabricación. *Rectificado*. [En línea] <https://es.scribd.com/document/272441132/Rectificado>.
46. **Herramienta, Instituto Máquina**. Mecanizado por abrasión. [En línea] <http://www.imh.eus/es/comunicacion/dokumentazio-irekia/manuales/introduccion-a-los-procesos-de-fabricacion/conformacion-por-mecanizado/mecanizado-por-abrasion/referencemanual-all-pages>.
47. *Bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045*. **Díaz, Silvio y Robert, Teresita**. Santa Clara : Universidad Central de las Villas, 2005.
48. **Kalpajian, Serope y Schmid, Steven**. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Naucalpan de Juárez : Pearson Educación de México S.A. de C.V., 2002.
49. **ECOROLL**. EG45 Tools for concave fillets and contours. [En línea] <http://www.ecoroll.de/en/products/single-roller-tools/eg45-hohlkehlen-und-konturen.html>.
50. *Variation Risk Management and Decision Making*. **Andréasson, Isabelle y Catalano, Gabriele**. Gotemburgo : CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2014.
51. **Sullivan, Frost &**. Transformational Growth. [En línea] 2016. <https://ww2.frost.com/>.
52. **Wikipedia**. Velocidad de corte. [En línea] 2018. https://es.wikipedia.org/wiki/Velocidad_de_corte.
53. —. Design—Expert. [En línea] 2017. <https://en.wikipedia.org/wiki/Design%E2%80%93Expert>.
54. —. Response surface methodology. [En línea] 2018. https://en.wikipedia.org/wiki/Response_surface_methodology.
55. *Surface roughness modeling using RSM for HSLA steel by coated carbide tools*. **Azam, Muhammad, y otros, y otros**. Taxila : Springer-Verlag, 2014.

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1. 1. EJEMPLOS DE PARÁMETROS IMPULSORES DE LA TECNOLOGÍA (PIT) | 7 |
| TABLA 2. 1. SÍMBOLOS PARA DESARROLLAR DIAGRAMA DE ÁRBOL (9) | 14 |
| TABLA 2. 2. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD KPC'S | 31 |
| TABLA 2. 3. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VARIACIÓN DE NF | 32 |
| TABLA 3. 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA AISI 4XX (35) | 41 |
| TABLA 3. 2. PROPIEDADES DEL ACERO 4XX (35) | 42 |
| TABLA 4. 1. COMPARACIÓN DE VELOCIDAD DE REMOCIÓN DE MATERIAL PARA MAQUINADO (52) | 58 |
| TABLA 4. 2. FACTORES DE RUIDO (NF) | 62 |
| TABLA 4. 3. PARÁMETROS DE OPERACIÓN "ROLADO DE RADIOS" PARA COMPONENTE MUÑÓN DE DIRECCIÓN | 63 |
| TABLA 4. 4. PARÁMETROS PARA DESARROLLAR LA TABLA DE EXPERIMENTOS | 64 |
| TABLA 4. 5. MATRIZ DE EXPERIMENTOS 2 ⁴ FACTORIAL COMPLETO PARA K=4 | 64 |
| TABLA 4. 6. PARÁMETROS PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES EN DIÁMETRO DE SELLO (DS) | 65 |
| TABLA 4. 7. PARÁMETROS PARA PRUEBAS EXPERIMENTALES EN DIÁMETRO BALERO INTERIOR (DBI) | 65 |
| TABLA 4. 8. CORRIDAS EXPERIMENTALES PARA LAS PRIMERAS 4 PIEZAS A MAQUINAR | 69 |
| TABLA 4. 9. CORRIDAS EXPERIMENTALES PARA LAS ÚLTIMAS 4 PIEZAS A MAQUINAR | 70 |
| TABLA 4. 10. ESFUERZOS COMPRESIVOS PARA EL RADIO DE DIÁMETRO DE SELLO (kSi) | 73 |
| TABLA 4. 11. ESFUERZOS COMPRESIVOS PARA EL RADIO DE DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR (kSi) ... | 73 |
| TABLA 5. 1. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES COMPRESIVOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA DIÁMETRO DE SELLO | 76 |
| TABLA 5. 2. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES COMPRESIVOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS PARA DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR | 76 |
| TABLA 5. 3. ANÁLISIS DE VARIANZA Y COVARIANZA POBLACIONAL PARA LOS EXPERIMENTOS DE LAS MUESTRAS DE LAS TABLAS 5.1 Y 5.2 | 78 |
| TABLA 5. 4. OBTENCIÓN DEL VALOR DE RESPUESTA DE ESFUERZOS COMPRESIVOS $Y_{S\Theta}$ PARA VALOR DE NIVEL MÍNIMO | 82 |
| TABLA 5. 5. OBTENCIÓN DEL VALOR DE RESPUESTA DE ESFUERZOS COMPRESIVOS $Y_{S\Theta}$ PARA VALOR DE NIVEL MÁXIMO | 82 |
| TABLA 5. 6. OBTENCIÓN DEL VALOR DE RESPUESTA DE ESFUERZOS COMPRESIVOS $Y_{B\Theta}$ PARA VALOR DE NIVEL MÍNIMO | 84 |
| TABLA 5. 7. OBTENCIÓN DEL VALOR DE RESPUESTA DE ESFUERZOS COMPRESIVOS $Y_{B\Theta}$ PARA VALOR DE NIVEL MÁXIMO | 84 |
| TABLA 5. 8. VMEA PARA DIÁMETRO DE SELLO $Y_{S\Theta}$ | 86 |
| TABLA 5. 9. VMEA PARA DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR $Y_{B\Theta}$ | 86 |
| TABLA 5. 10. (A) VALORES Y (B) VARIABLES PARA MODELO POLINOMIAL DE DIÁMETRO DE SELLO | 87 |
| TABLA 5. 11. (A) VALORES Y (B) VARIABLES PARA MODELO POLINOMIAL DE DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR | 89 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 2. 1. EJEMPLO DE DIAGRAMA DE ANÁLISIS ÁRBOL DE FALLA (9)..... | 17 |
| FIGURA 2. 2. CRITERIO DE EVALUACIÓN PARA SEVERIDAD (5) | 21 |
| FIGURA 2. 3. CRITERIO DE EVALUACIÓN PARA OCURRENCIA (5) | 22 |
| FIGURA 2. 4. CRITERIO DE EVALUACIÓN PARA DETECCIÓN (5) | 23 |
| FIGURA 2. 5. EJEMPLO DE DESARROLLO DE UN AMEF (11) | 24 |
| FIGURA 2. 6. ESQUEMA DE CARGA-FUERZA (16) | 26 |
| FIGURA 2. 7. PROCESO DE SELECCIÓN DE KPC Y VMEA (13) | 27 |
| FIGURA 2. 8. DESGLOSE DE KPC EN SUB-KPC Y NF's..... | 30 |
| | |
| FIGURA 3. 1. COMPONENTE MUÑÓN PARA EJE FRONTAL (32) | 40 |
| FIGURA 3. 2. PROCESO DE FRESADO. A) MOVIMIENTO DE AVANCE Y B) MOVIMIENTO DE CORTE (36).... | 44 |
| FIGURA 3. 3. PROCESO DE TORNEADO (38) | 44 |
| FIGURA 3. 4. HERRAMIENTAS EN UN CENTRO DE MAQUINADO (40) | 45 |
| FIGURA 3. 5. DIAGRAMA TTT CONTINUO (41) | 46 |
| FIGURA 3. 6. PROCESO DE REVENIDO (43)..... | 47 |
| FIGURA 3. 7. PROCESO DE BROCHADO (44)..... | 48 |
| FIGURA 3. 8. PROCESO DE RECTIFICADO (46)..... | 48 |
| FIGURA 3. 9. PROCESO DE ROLADO (49)..... | 49 |
| FIGURA 3. 10. LAYOUT DEL PROCESO DE MUÑÓN | 50 |
| FIGURA 3. 11. EJEMPLO DE MATRIZ DE CARACTERÍSTICAS..... | 51 |
| | |
| FIGURA 4. 1. METODOLOGÍA PARA EL MAPA TECNOLÓGICO DE PROCESO DE MANUFACTURA (MTPM) 54 | |
| FIGURA 4. 2. SECCIÓN I: ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE VARIACIÓN (VMEA) | 56 |
| FIGURA 4. 3. SECCIÓN II: EVALUACIÓN FACTIBILIDAD DE PIT | 59 |
| FIGURA 4. 4. SECCIÓN III: ANÁLISIS DE OPORTUNIDADES PARA NUEVAS TECNOLOGÍAS..... | 60 |
| FIGURA 4. 5. DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA EIC | 61 |
| FIGURA 4. 6. COMPONENTE MUÑÓN DE DIRECCIÓN SEÑALANDO LOS DIÁMETROS SELLO Y DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR | 66 |
| FIGURA 4. 7. CALIBRADORES Go - No Go PARA MEDIR LOS DIÁMETROS BALERO INTERIOR Y SELLO EN OPERACIÓN DE RECTIFICADO | 67 |
| FIGURA 4. 8. AJUSTE DEL INDICADOR DE PRESIÓN EN MILÍMETROS PARA UNA FUERZA DE ROLADO EN LIBRAS..... | 68 |
| FIGURA 4. 9. HERRAMIENTAS DE RODILLO PARA OPERACIÓN DE ROLADO DE RADIOS | 68 |
| FIGURA 4. 10. AJUSTE DE VELOCIDAD DE AVANCE EN LA OPERACIÓN A UN 50% Y 150%..... | 68 |
| FIGURA 4. 11. A) CORTADORA Y B) COMPONENTES SECCIONADOS..... | 70 |
| FIGURA 4. 12. MUÑÓN DE DIRECCIÓN SECCIONADO MOSTRANDO LOS RADIOS DE BALERO INTERIOR Y SELLO..... | 71 |
| FIGURA 4. 13. MUÑÓN DE DIRECCIÓN SECCIONADO PREPARADO PARA ESTUDIO DE RAYOS X | 72 |
| FIGURA 4. 14. A) EQUIPO DE RAYOS X PARA ESTUDIO DE ESFUERZOS COMPRESIVOS B) ÁNGULO DE POSICIONAMIENTO DE PIEZA A EVALUAR..... | 72 |
| | |
| FIGURA 5. 1. RELACIÓN DE ESFUERZOS COMPRESIVOS PARA LOS DIFERENTES ÁNGULOS DE MEDICIÓN. A) DIÁMETRO DE SELLO Y B) DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR..... | 77 |
| FIGURA 5. 2. MODELO DE RESPUESTA DE DISEÑO COMPUESTO CENTRAL (CCD) (55) | 80 |
| FIGURA 5. 3. MODELOS DE RESPUESTA TIPO CCD (DISEÑO COMPUESTO CENTRAL): EL CUBO (A) MUESTRA EL CUBO DE RESPUESTA DEL DIÁMETRO DE SELLO Y1s. MIENTRAS, EL CUBO (B) MUESTRA LA RESPUESTA DEL DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR Y2B..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 5. 4. RESPUESTA LINEAL DE CADA FACTOR INVOLUCRADO EN INTERACCIÓN MÚLTIPLE PARA Y1S (KSI) | 92 |
| FIGURA 5. 5. RESPUESTA LINEAL DE CADA FACTOR INVOLUCRADO EN INTERACCIÓN MÚLTIPLE PARA Y2B (KSI) | 94 |
| FIGURA 5. 6. SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA DIÁMETRO DE SELLO (Y1S) CONSIDERANDO CONSTANTE EL FACTOR C: DESGASTE DE HERRAMIENTA EN -3.25% | 95 |
| FIGURA 5. 7. SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA DIÁMETRO DE BALERO INTERIOR (Y2B) CONSIDERANDO CONSTANTE EL FACTOR C: DESGASTE DE HERRAMIENTA EN -3.25% | 96 |
| FIGURA 5. 8. VARIACIÓN DE RESPUESTA PARA SELLO (Ys) CONSIDERANDO UN DESGASTE DE HERRAMIENTA DE -3.11% | 97 |
| FIGURA 5. 9. VARIACIÓN DE RESPUESTA PARA BALERO INTERIOR (Y2B) CONSIDERANDO UN DESGASTE DE HERRAMIENTA DE -3.25% | 97 |
| FIGURA 5. 10. (A) SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA DIÁMETRO DE SELLO (Y1S) CONSIDERANDO CONSTANTE EL FACTOR B: AVANCE DE HERRAMIENTA EN 0.0027 IN/RPM. (B) ANÁLISIS DE RESPUESTA QUE MUESTRA EL MAPA DE PERFILES DE ISOESFUERZOS SOBRE LA SUPERFICIE DEL DIÁMETRO DE SELLO | 99 |
| FIGURA 5. 11. (A) SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA DIÁMETRO DE BALERO (Y2B) CONSIDERANDO CONSTANTE EL FACTOR B: AVANCE DE HERRAMIENTA EN 0.002 IN/RPM. (B) ANÁLISIS DE RESPUESTA QUE MUESTRA EL MAPA DE PERFILES DE ISOESFUERZOS SOBRE LA SUPERFICIE DEL DIÁMETRO DE BALERO | 99 |
| FIGURA 5. 12. (A) SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA DIÁMETRO SELLO (Y1S) CONSIDERANDO CONSTANTE EL FACTOR A: PRESIÓN DE LA HERRAMIENTA EN 263.24 LBF/IN ² . (B) ANÁLISIS DE RESPUESTA QUE MUESTRA EL MAPA DE PERFILES DE ISOESFUERZOS SOBRE LA SUPERFICIE DEL DIÁMETRO DE SELLO | 100 |
| FIGURA 5. 13. (A) SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA DIÁMETRO DE BALERO (Y2B) CONSIDERANDO CONSTANTE EL FACTOR A: PRESIÓN DE LA HERRAMIENTA EN 219 LBF/IN ² . (B) ANÁLISIS DE RESPUESTA QUE MUESTRA EL MAPA DE PERFILES DE ISOESFUERZOS SOBRE LA SUPERFICIE DEL DIÁMETRO BALERO | 101 |
| FIGURA 5. 14. OBTENCIÓN DE LA CONDICIÓN ÓPTIMA PARA LA RESPUESTA DE DIÁMETRO DE SELLO (Y1S) | 102 |
| FIGURA 5. 15. OBTENCIÓN DE LA CONDICIÓN ÓPTIMA PARA LA RESPUESTA DE DIÁMETRO BALERO INTERIOR (Y2B) | 103 |